

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Факультет електроніки
кафедра електронних приладів та пристроїв

«На правах рукопису»
УДК 621.385.69

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис) Л.Д. Писаренко
(ініціали, прізвище)
“ ____ ” _____ 2019 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра
зі спеціальності 171 Електроніка

на тему:

«Дослідження опорного генератора мікрохвильового синтезатора для
пристрою перетворення частоти»

Виконав:

студент II курсу, групи ДЕ-81мп
Огуревич Ярослав Володимирович

(підпис)

Науковий керівник: доцент, к.т.н., Кобак М.М.

(підпис)

Консультант: асистент, Грамарчук Ю.О.

(підпис)

Нормоконтроль: доцент, к.т.н. Чадюк В.О.

(підпис)

Рецензент: доцент, к.т.н., Татарчук Д.Д.

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Факультет електроніки
Кафедра електронних приладів та пристроїв

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною
програмою

Спеціальність (спеціалізація) – 171

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Л.Д. Писаренко
(підпис) (ініціали, прізвище)
«___» _____ 2019 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту**

Огуревичу Ярославу Володимировичу

1. Тема дисертації **«Дослідження опорного генератора мікрохвильового синтезатора для пристрою перетворення частоти»**

науковий керівник дисертації **доцент, к.т.н., Кобак Микола Миколайович**
затверджені наказом по університету від «07» листопада 2019 р. № 3859-с

2. Термін подання студентом дисертації 03.12.2019

3. Об'єкт дослідження: **опорний генератор мікрохвильового синтезу.**

4. Вихідні дані: Розробити мікрохвильовий перетворювач синтезатора що, працює в широкому діапазоні хвиль і включає в себе опорний генератор на об'ємно акустичних хвилях. Вибір оптимальної конструкції опорного генератора та розрахувати основні параметри, що впливають на його роботу.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: огляд науково-технічної літератури по опорним генераторам (на основі НВЧ - синтезаторів) (характеристики, принципи побудови, різновиди); теоретична частина (структура побудови опорного генератора на основі об'ємно акустичних хвиль); конструкторсько – технологічна частина (розрахунок основних параметрів опорного генератора та представлення еквівалентної схеми реалізації); експериментальна частина (математичний розрахунок потенціалу і зміщення в кожній точці багатопарової структури опорного генератора).

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: плакати.

7. Перелік публікацій:

- 1) Перетворювач частоти з опорним генератором на об'ємноакустичних хвилях: матеріали XIII-ї науково-практичної конференції «Перспективні напрямки сучасної електроніки» / Огуревич Я.В., Грамарчук Ю.О., к.т.н., доц. Кобак М.М. – КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФЕЛ, – 4 квітня 2019 р. – с. 154-158.
- 2) Сверхвысокочастотный преобразователь частоты с опорным генератором на объемно-акустических волнах: Colloquium-journal the Polish international journal of scientific publications / Огуревич Я.В., Грамарчук Ю.О., к.т.н., доц. Кобак М.М.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Експериментальна частина	Асистент Грамарчук Ю.О.		

9. Дата видачі завдання: 01.09.2019

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів магістерської дисертації	Строк виконання етапів	Примітка
1	Огляд науково-технічної літератури по опорним генераторам мікрохвильового синтезатора (характеристики, принципи побудови, різновиди)	04.09.2019 - 22.09.2019	
2	Теоретична частина (теоретичних підбір найоптимальнішої робочої хвилі в резонаторі та представлення факторів, які впливають на основні параметри резонаторів на ОАХ)	25.09.2019 - 06.10.2019	
3	Конструкторсько-технологічна частина: -математичне моделювання резонатора (розрахунок основних параметрів акусто-електронного резонатору, реалізація еквівалентної схеми опорного генератора)	09.10.2019 - 20.10.2019	
4	Експериментальна частина (математичний розрахунок потенціалу і зміщення в кожній точці багаточислової структури опорного генератора)	23.10.2019 - 03.11.2019	
5	Оформлення пояснювальної записки, креслення, плакатів, підготовка доповіді	10.11.2019 - 20.11.2019	

Студент гр. ДЕ-81мп

Огуревич Я.В.

Керівник проекту

Кобак М.М.

[illegible]

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломного проекту

на тему:

**«Дослідження опорного генератора мікрохвильового синтезатора
для пристрою перетворення частоти»**

Київ – 2019

Р Е Ф Е Р А Т

Дослідження опорного генератора мікрохвильового синтезатора для пристрою перетворення частоти

Магістерська дисертація освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр» спеціальності 171- Електроніка, спеціалізації – Електронні прилади та пристрої. Огуревич Ярослав Володимирович. КПІ ім. Ігоря Сікорського. Факультет електроніки, кафедра «Електронні прилади та пристрої». Група ДЕ-81мп. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 64 с., іл. 38, табл. 18.

Ключові слова: вимірювання рівня, радарний рівнемір, радар, NB-IoT.

Короткий зміст роботи: В магістерській дисертації представлено огляд науково-технічної літератури по перетворювачам синтезаторів (характеристики, принципи побудови, різновиди). Об'єктом дослідження є програмовані швидкодіючі та високоточні перетворювачі синтезаторів частоти міліметрового діапазону довжини хвиль.

Метою роботи є теоретичне дослідження та аналіз хвильових акустичних процесів в багатошарових п'єзо-кристалічних структурах на основі математичного моделювання та вирішення хвильових рівнянь п'єзо-акустики методом кінцевої елементів, а також числовий аналіз і оптимізація параметрів НВЧ тонко плівкових акусто-електронних резонаторів (ТАЕР) на основі багатошарових тонко плівкових структур, враховуючи п'єзо шар з нітрату алюмінію AlN , працюючих в ГГц діапазоні частот.

Предметом дослідження акустичні хвилі різного типу, що поширюються в багатошарових тонко плівкових п'єзо-кристалічних структурах. Складність дослідження властивостей таких хвиль пов'язана з тим, що анізотропія властивостей кристала, а також безліч шарів в структурі не дозволяє провести аналіз параметрів таких акустичних хвиль в загальному вигляді. Потрібне залучення чисельних методів розрахунку. Таким чином, в даний момент завдання аналізу і чисельного моделювання хвильових процесів, що відбуваються в багатошарових тонко плівкових структурах, безсумнівно

залишається актуальною в акусто-електроніці. Існують методи вдосконалення структури і обґрунтування параметрів синтезаторів частоти міліметрового діапазону довжини хвиль за критерієм мінімуму власних шумів і побудови їх на новій елементній базі на об'ємно-акустичних хвилях.

Найважливішими вимогами, які пред'являються до сучасних опорних генераторів є: максимальна стабільність НВЧ параметрів (амплітуди і фази) вихідного сигналу, висока стабільність НВЧ параметрів до зовнішнього кліматичного і механічного впливу при його експлуатації, швидке встановлення робочого режиму перетворювача, зниження масо – габаритних показників.

Завдання, що були вирішені у процесі складання магістерської дисертації:

- досліджено існуючу область розробки керованих синтезаторів частоти міліметрового діапазону довжини хвиль та проаналізовано їх на предмет можливості вдосконалення як систем в цілому, так і їх окремих частин;
- обґрунтовано та вдосконалено структуру опорного генератора;
- проведений числовий аналіз і оптимізація параметрів НВЧ тонко плівкових акусто-електронних резонаторів на основі багатошарової тонко плівкової структури, яка включає в себе п'єзо шар з нітриду алюмінію.

АНОТАЦІЯ

Об'єктом дослідження є опорний генератор мікрохвильового синтезатор частоти дециметрових довжин хвиль. Дослідження полягає у математичному розрахункові потенціалу і зміщення в кожній точці багатопарової структури опорного генератора та моделювання його еквівалентної схеми для підвищення продуктивності та розрахунків основних параметрів системи.

Предметом дослідження є акустичні хвилі різного типу, що поширюються в багатопарових тонко плівкових п'єзо-кристалічних структурах. Складність дослідження полягає в властивостях таких хвиль пов'язана з тим, що анізотропія властивостей кристала, а також безліч шарів в структурі опорного генератора не дозволяє провести аналіз параметрів таких акустичних хвиль в загальному вигляді.

Задачі, що були вирішені для досягнення мети, наступні:

- досліджена існуюча область розробки керованих синтезаторів частоти міліметрового діапазону довжини хвиль та проаналізувати їх на предмет можливості вдосконалення окремих частин системи, конкретно – опорного генератора;
- обґрунтування та вдосконалення структуру опорного генератора;
- числовий аналіз і оптимізація параметрів НВЧ тонко плівкових акусто-електронних резонаторів на основі багатопарової тонко плівкової структури, яка включає в себе п'єзо шар з нітриду алюмінію.

Виконання завдань вказує на можливість створення на основі багатопарової тонко плівкової структури, яка включає в себе п'єзо шар з нітриду алюмінію, опорного генератора з поліпшеними характеристиками. Можливі напрямки для подальших досліджень може включати в себе: експериментальні тести моделі, експериментальне дослідження впливу геометричної побудови опорного генератора на його характеристики.

S U M M A R Y

Object is a reference oscillator microwave frequency synthesizer decimeter wavelengths. The research is mathematical calculation and offset potential at each point of reference generator multilayer structure and its equivalent circuit design to improve performance and calculation of basic system parameters.

The subject of the study are different types of acoustic waves propagating in multilayer thin film piezo-crystal structures. The complexity of the research is the properties of waves due to the fact that the properties of the crystal anisotropy, and lots of layers in the structure of the reference oscillator does not allow to analyze parameters of acoustic waves in general.

Tasks that have been resolved to achieve the goal, the following:

- The existing managed the design frequency synthesizer millimeter wavelengths and analyze them for the possibility of improving certain parts of the system, specifically - the reference oscillator;
- study and improve the structure of the reference oscillator;
- numerical analysis and optimization of parameters of microwave thin film electro-acoustic resonators based multilayer thin film structure that includes a piezo layer of aluminum nitride.

Tasks points to the possibility of creating based multilayer thin film structure that includes a piezo layer of aluminum nitride, reference generator with improved performance. Possible directions for future research may include: experimental model tests, the experimental study of the effect of geometrical construction of the reference oscillator to its characteristics

З М І С Т

ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ	11
ВСТУП	12
 1. ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	15
1.1. Характеристики синтезаторів частот.....	15
1.2. Загальні принципи побудови синтезаторів частот.....	18
1.3. Синтезатори, виконані за методом прямого синтезу.....	18
1.4. Синтезатори частот, виконані за методом непрямого синтезу.....	20
1.5. Класифікація опорних генераторів синтезаторів частот	21
1.6. Тонко плівковий опорний генератор на об'ємно акустичних хвилях.....	22
В и с н о в к и	26
 2. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА.....	27
2.1. Типи акустичних хвиль, які розповсюджуються в багато шарових тонко плівкових структурах.....	27
2.2. Поверхнево акустичні хвилі.....	29
2.3. Хвилі Лемба.....	30
2.4. Тип робочих хвиль в тонко плівковому резонаторі мембранного типу.....	32
2.5. Аналіз фізичних та конструктивних факторів, які впливають на основні характеристики акусто-електронних резонаторів.....	32
2.6. Вплив матеріалів електродів на добротність.....	34
2.7. Вплив технічних похибок на основні параметри акусто-електронних резонаторів.....	37
В и с н о в к и	39
 3. КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....	40
3.1. Основні параметри електронно-акустичних резонаторів.....	40
3.2. Методика та алгоритми розрахунків основних параметрів акусто-електронних резонаторів	44
3.3. Еквівалентна схема резонатора на ОАХ.....	45
В и с н о в к и	50
 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	51
4.1. Числовий розрахунок параметрів ОАХ, які розповсюджуються в багатошарових тонко плівкових п'єзо електричних структурах.....	51
4.2. Метод скінченних елементів для вирішення рівнянь п'єзо-вкустики.....	57
В и с н о в к и	60
 ВИСНОВКИ	62
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	64

					МРП.171.081.011 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<div>Опорний генератор мікрохвильового синтезатора</div> <div>Пояснювальна записка</div>		
Розроб.		Огуревич Я. В					
Перевір.		Кобак М. М.					
Реценз.							
Н. Контр.		Чадюк В.О.					
Затверд.		Писаренко Л.Д.			<div>Літ.</div> <div>Арк.</div> <div>Аркушів</div> <div>КПІ ім. Ігоря Сікорського, ФЕЛ, гр. ДЕ-81мп</div>		
						10	68

ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

ГНК – генератор керований напругою,
ТАЕР – тонко плівковий акусто-електронний резонатор,
ПЦС – прямі цифрові синтезатори,
ПАС – прямий аналоговий синтез,
АПЧ – автоматичне підналаштування частоти,
ФАПЧ – фазова автопідстройка частоти,
ПАХ – поверхнево-акустичні хвилі
ОАХ – об’ємно-акустичні хвилі
СЧ – синтезатор частоти,
ФК – фазова когерентність,
РЛС – радіолокаційна станція,
ОГ – опорний генератор,
ДЧ – дільник частоти,
ПЧ – помножувач частоти,
ДОЧ – датчик опорної частоти,
БОЧ – блок опорних частот,
ЧАП – частотне автопідстроювання частоти,
ЧД – частотний детектор,
ФД – фазовий детектор,
ІФАП – імпульсно - фазова автопідстройка,
ІФД – імпульсно - фазовий детектор,
ГП – генератор пошуку,
КГ – керований автогенератор,
ДЗКД - дільник частоти із змінним коефіцієнтом ділення

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

ВСТУП

Для генерації надвисоких частот на сьогоднішній день зазвичай використовують метод, який побудований на методі з'єднання структури синтезатора частоти з генератором, керований напругою на кварцовому задавальному генераторі. Для реалізації цього задуму винайдено (і продовжується пошук вирішення даного питання) безліч схем з'єднання цих структурних елементів, але для стабілізації НВЧ необхідно використовувати діелектричні високо добротні резонатори.

В свою чергу не стоїть на місці і розвиток приймально-перетворювальних систем, що призвів до пошуку вирішень вдосконалення НВЧ – пристроїв, а саме:

- забезпечення енергоефективності пристроїв;
- збільшення продуктивності;
- зменшення габаритних розміри;

Використання традиційних засобів для реалізації схеми опорного генератора, наприклад, як кварцовий задавальний елемент або ПАХ, не забезпечує вимог стабільності, а також завдає проблеми при переналаштуванні частот, що призводять до обмеженого застосування радіопристроїв, таких як обмеження в багатоканальності.

Пристрої на основі об'ємно-акустичних хвиль використовуються для генерації та вибіркової сигналізації приймально-перетворювального обладнання та мають ряд наступних переваг над пристроями з використанням ПАХ, а саме:

- менший вплив зовнішніх полів;
- кращі властивості до «захоплення» акустичної енергії.
- більша добротність;

Для приладів, які працюють в діапазоні $2 \div 20$ ГГц важко створити задовільні умови для роботи на основі ПАХ-хвиль та LC-компонентах.

Одним із шляхів вирішень проблеми є необхідність використання

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

при розробці НВЧ – акусто-електронних пристроїв тонко плівкової п'єзо кристалічної структури, товщина якої порівняно з довжиною акустичних хвиль, повинна бути в рази меншою.

На сьогоднішній день, представлення наступна класифікація опорних за давальних генераторів , а саме:

1. Діелектричні резонатори – генератори, стабілізовані по частоті. Такий вид потребує використання високودобротних матеріалів, а також дільників та помножувачів частоти, які при зменшенні габаритів пристроя призводить до збільшення відносної нестабільності.

2. Кварцова стабілізація гетеродинного типу. Застосовується в радіоелектронному обладнанні наземних та бортових систем зв'язку і вимагає додаткових мір для покращення якості сигналу (віброзахист тощо).

3. ГКН – генератор, що керується напругою. Пристрій працює у діапазоні $1 \div 8$ ГГц, що застосовує розв'язку на підсилювачі для польових транзисторах та діодах Ганна.

Даний вид генератора застосовується з метою використання в умовах перевантажень та можливого впливу високих температур.

4. Генератор на поверхнево-акустичних хвилях - забезпечує зменшення масо-габаритних показників, але прямопропорційно збільшуються шумові складові сигналу зі збільшенням його частоти, які в свою чергу, унеможлиблює їх застосування в НВЧ – приладах.[1 с. 1-5]

Метою даної магістерської дисертації є теоретичне дослідження та аналіз хвильових акустичних процесів в багатошарових п'єзо-кристалічних структурах на основі математичного моделювання та вирішення хвильових рівнянь п'єзо-акустики способом кінцевої елементів, а також оптимізація і числовий аналіз параметрів НВЧ тонко плівкових акусто-електронних резонаторів (ТАЕР) на основі багатошарових тонко плівкових структур, враховуючи п'єзо шар з нітрату алюмінію AlN , що працюють в ГГц діапазоні частот.

Даний вид високо інтенсивного джерела коливань не створює взаємного електромагнітного перекриття, що в свою чергу дозволяє утворювати суцільні

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

монолітні схеми малошумних опорних генераторів.

Сучасні синтезатори частот відносять до областей радіоелектроніки, що найбільш динамічно розвиваються. Однією із особливостей побудови синтезаторів частоти є їх швидке невинне вдосконалення, що зумовлене безперервним розвитком матеріальної бази, практики і теорії їх реалізації.

Застосування міліметрового діапазону хвиль є принциповим моментом для досягнення високої точності визначення координат і високої дозволеної спроможності радіолокаційних систем, дальність дії яких не перевищує 5-10 км.

Задачі, необхідні вирішити для досягнення цієї мети, наступні:

- числовий аналіз і оптимізація параметрів НВЧ тонко плівкових акусто-електронних резонаторів на основі багатошарової тонко плівкової структури, яка включає в себе п'єзо шар з нітриду алюмінію;
- обґрунтувати та вдосконалити структуру опорного генератора;
- дослідити існуючу область розробки керованих синтезаторів частоти міліметрового діапазону довжини хвиль та проаналізувати їх на предмет можливості вдосконалення як систем в цілому, так і їх окремих частин.

Предметом дослідження акустичні хвилі різного типу, що поширюються в багатошарових тонких плівкових п'єзо-кристалічних структурах. Складність дослідження властивостей таких хвиль пов'язана з тим, що анізотропія властивостей кристала, а також безліч шарів в структурі не дозволяє провести аналіз параметрів таких акустичних хвиль в загальному вигляді. Потрібне залучення чисельних методів розрахунку. Таким чином, в даний момент задача чисельного моделювання і аналізу хвильових процесів, які відбуваються в багатошарових тонко плівкових структурах, безсумнівно залишається актуальною в акустoeлектроніці. Є способи удосконалення структури та обґрунтування параметрів синтезаторів частоти міліметрового діапазону довжини хвиль за критерієм мінімуму власних шумів і побудови їх на новій елементній базі на об'ємно-акустичних хвилях.

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

РОЗДІЛ I. ОГЛЯД НАУКОВО – ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Характеристики синтезаторів частот.

Кілька років назад прямі цифрові синтезатори частоти (ПЦС) були рідкістю та мали обмежену сферу застосування. Їх широке використання стримувалося складністю реалізації, а також недостатньо широким діапазоном робочих частот. Не дивлячись на те, що в даний момент найбільш популярні синтезатори на основі фазового автопідстроювання частоти, все частіше використовуються прямі цифрові синтезатори, що мають ряд оригінальних можливостей. Прямі цифрові синтезатори частоти уже не сприймаються виробниками як незрозумілі, дорогі і складні пристрої.

Термін «синтезатор частоти» означає електронний пристрій, що здатен формувати з опорної частоти на виході необхідну частоту або набір частот, згідно із керуючим сигналом. Найбільш поширеними є наступні методи синтезу частот:

- прямий аналоговий синтез (Прямий аналоговий синтез, ПАС) на основі структури фільтр/ змішувач дільник, при якому вихідна частота виходить безпосередньо з опорної частоти за допомогою операцій фільтрація, змішення, множення і ділення;
- непрямий (зовнішній) синтез на основі фазового автоматичного підстроювання частоти (АПЧ), при якому вихідна частота формується за допомогою додаткового генератора (найчастіше це генератор, що керується напругою - ГКН), що охоплений петлею ФАПЧ;
- прямий цифровий синтез (ПЦС) – синтез, при якому вихідний сигнал синтезується цифровими методами;
- гібридний синтез – представляє собою комбінацію декількох методів, описаних вище.

Кожен з цих методів синтезу частот має переваги і недоліки, отже, для кожного конкретного додатка потрібно робити вибір, заснований на найбільш прийнятною комбінації компромісів.

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

До основних параметрів, що характеризують якість синтезатора частоти, відносяться:

- чистота спектру вихідного сигналу;
- швидкість перебудови;
- діапазон перебудови (смуга частот вихідного сигналу);
- кількість частот, що генеруються;
- частотне розширення;
- якомога вища стабільність частоти сформованого сигналу;
- гранично низькі фазові й амплітудні шуми
- гнучкість (можливість здійснення різних видів модуляції);
- можливість швидкої зміни сформованих частот;
- когерентність усіх сформованих сигналів;
- максимально широка смуга робочих частот;
- нерозривність фази вихідного сигналу при перебудові;
- висока чистота спектрів.

Реалізація сукупності перерахованих характеристик здійснюється за допомогою синтезаторів частот різного призначення.

Синтезом частот являє собою процес, в результаті дії якого одна або безліч частот формуються із однієї або декількох опорних частот за допомогою комбінацій елементів, які входять в схему синтезатора частот (СЧ).

Найбільш поширеними з них є дільники і помножувачі частоти, фільтри, комутатори, змішувачі, фазові і частотні детектори, генератори, підсилювачі і так далі. [2 с.75-76]

Оскільки будь-який НЧ можна представити еквівалентним генератором, то і всі параметри що, визначаються звичайними генераторами, можна застосувати для характеристики НЧ, які підрозділяються на експлуатаційні й електричні.

До таких основних електричних характеристик синтезатора частот відносяться:

- діапазон робочих вихідних частот;
- стабільність частоти вихідного сигналу;

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

- час перемикання частот;
- ширина смуги робочих вихідних частот;
- крок сітки робочих частот;
- рівень амплітудних і фазових шумів;
- наявність або відсутність фазової когерентності.
- рівень дискретних побічних складових спектрів вихідних сигналів ;

До основних експлуатаційних характеристик СЧ відносять:

- споживання енергії джерел живлення;
- час готовності після ввімкнення;
- габаритно-масові показники.

Діапазон робочих вихідних частот характеризує область частот, в якій знаходиться центральна частота коливань, що синтезується. Згідно міжнародної класифікації, радіочастотний спектр можна умовно розбити на діапазони і представлений в Табл.1.1.

Таблиця 1.1. – Радіочастотний діапазон

Діапазон		Частота	Діапазон		Частота
1	<i>HF</i>	3 – 30 МГц	7	<i>Ku</i>	12 – 18 ГГц
2	<i>VHF</i>	30 – 300 МГц	8	<i>K</i>	18 – 27 ГГц
3	<i>UHF</i>	300 – 1000 МГц	9	<i>Ka</i>	27 – 40 ГГц
4	<i>L</i>	1 – 2 ГГц	10	<i>V</i>	40 – 75 ГГц
5	<i>C</i>	2 – 8 ГГц	11	<i>W</i>	75 – 110 ГГц
6	<i>X</i>	8 – 12 ГГц	12	<i>Mm</i>	110 – 300 ГГц

Приналежність СЧ до того або іншого діапазону частот у значній мірі обумовлює технологічні і конструктивні проблеми його створення, зв'язані у першу чергу з можливостями сучасної матеріальної бази.[3 с.140-142]

1.2. Загальні принципи побудови синтезаторів частот.

Практичні схеми синтезаторів частот дуже різні. Не дивлячись на цю різноманітність, можна відмітити загальні принципи, які лежать в основі побудови сучасних синтезаторів:

- синтез частот виконується широким використанням помножувачем, дільників та перетворювачами частоти, які забезпечують використання одного опорного коливання для формування сітки частот;
- забезпечення синтезаторами частот декадного встановлення частоти збудника;
- всі синтезатори засновані на використанні одного високо стабільного опорного коливання з деякою частотою f_0 , джерелом якого є опорний кварцовий генератор.

По методу формування вихідних коливань синтезатори поділяються на дві основні групи: виконані за методом непрямого (активного) синтезу і виконані за методом прямого (пасивного) синтезу.

До першої групи належать синтезатори, які формують вихідні коливання в діапазоні автогенератора гармонічних коливань з параметричною стабілізацією частоти, нестабільність якого усувається системою АПЧ за еталонними (високостабільними) частотами.

До другої групи належать синтезатори, в яких вихідні коливання формуються за допомогою множення та ділення частоти опорного генератора з подальшим складанням та відніманням частот, що отримані в результаті ділення та множення.

Синтезатори обох груп можуть бути виконані з використанням цифрової або аналогової елементної бази.[4 с. 37-39]

1.3. Синтезатори, виконані за методом прямого синтезу.

Високостабільний кварцовий опорний генератор формує коливання з частотою f_0 , що надходять на помножувачі та дільники частоти ПЧ і ДЧ. Дільники частоти знижують частоту опорного генератора f_0 в число разів (d), а помножувачі частоти збільшують її в число разів (k). Частоти, які отримані в результаті

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

множення та ділення частоти ОГ (f_0), використовуються для формування опорних частот у спеціальних пристроях, що називають датчиками опорних частот ДОЧ.

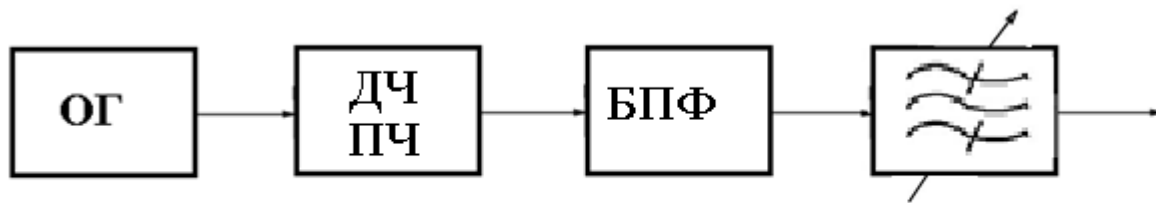


Рис. 1.1. Блок-схема синтезатора, виконаного за методом прямого синтезу де, ОГ – опорний генератор; ДЧ, ПЧ – дільники та помножувачі частоти; БПФ – блок перетворення і фільтрації;

Загальна кількість датчиків опорних частот у синтезаторі частот СЧ залежить від діапазону формованих СЧ і інтервалу між сусідніми частотами: чим ширше діапазон частот синтезатора частот та менше інтервал, тим більша кількість датчиків опорних частот потрібно.

При декадній установці частоти кожен датчик опорної частоти формує 10 ОЧ з певним інтервалом між сусідніми частотами. Загальна кількість потрібних датчиків описується кількістю розрядів в записі максимальної частоти синтезатора.

Наприклад, максимальна частота синтезатора, яка формує сітку частот з інтервалом $\Delta f = 1 \text{ кГц}, 5 \text{ МГц} = 5000 \text{ кГц}$, тобто містить чотири розряду. Тому синтезатор повинен мати чотири датчика опорних частот:

ДОЧ I, формує десять частот з інтервалом $\Delta f_1 = 1 \text{ кГц}$,

ДОЧ II - 10 частот з інтервалом $\Delta f_2 = 10\Delta f_1 = 10 \text{ кГц}$,

ДОЧ III - 10 частот з інтервалом $\Delta f_3 = 10\Delta f_2 = 100 \text{ кГц}$,

ДОЧ IV формує частоти з інтервалом $\Delta f_4 = 10\Delta f_3 = 1000 \text{ кГц} = 1 \text{ МГц}$.

Кількість опорних частот з інтервалом 1 МГц в даному прикладі тільки п'ять.

Опорні частоти, сформовані у датчиках, подаються на змішувачі. Смугові перемикаючі фільтри, ввімкнені на виході змішувачів, виділяють в даному прикладі сумарну частоту: на виході першого $f_1 + f_2$, на виході другого $f_1 + f_2 + f_3$, на вихід третього $f_1 + f_2 + f_3 + f_4$.

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

Частота на виході збудника при декадній установці визначається положеннями перемикачів кожної декади. [4 с. 55-58]

Відносна нестабільність частоти на виході синтезатора дорівнює нестабільності ОГ. Недоліком такого типу синтезаторів є наявність на його виході великого числа комбінаційних частот, що пояснюється широким використанням змішувачів.

1.4. Синтезатори частот, побудований за методом непрямого синтезу.

У синтезаторах, які виконані за методом непрямого синтезу, у яких джерело вихідних коливань являють собою діапазонний автогенератор гармонійних коливань, автоматично підстроюється по високим стабільним частотам, які формується у БОЧ.

Суть автоматичного підстроювання частоти полягає в коливанні автогенератора за допомогою високо стабільних частот перетворюються до деякої постійної частоті $f_{АПЧ}$, що порівнюється зі зразковим частотним значенням. Якщо розбіжності порівнюваних частот формується керуюча напруга, яка подається на управляючий реактивний елемент та змінює значення його реактивності (індуктивності або ємності). Керовані реактивні елементи вмикаються у контур, який визначає частоту опорного генератора. Частота опорного генератора змінюється до тих пір, доки $f_{АПЧ}$ не наблизиться до зразкової частоти з досить малим залишковим розладом.

В залежності від пристрою порівняння всі системи автоматичного підстроювання частоти можна поділити на 3 види:

- системи з фазовим автопідстроюванням частоти ФАПЧ, що використовують фазові детектори ФД; як порівнюючі пристрої.
- системи з імпульсно-фазовим автопідстроюванням частоти ІФАП, в якій порівнюють чим пристроєм є імпульсно-фазові детектори ІФД.
- системи з частотним автопідстроюванням частоти ЧАП, в яких у якості порівнювального пристрою застосовуються частотні детектори ЧД; [6 с. 1-4]

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

1.5 Класифікація опорних генераторів синтезаторів частот.

Прямі цифрові синтезатори DDS частоти відіграють велику роль у сучасних радіоелектронних пристроях та системах. Це забезпечується значними перевагами: висока роздільна здатність, широка синтезована смуга частот, швидкість перебудови синтезатора з частоти на частоту. Багаторівневі DDS в силу своєї надійності, можливості мікромініатюризації, технологічності та унікальності технічних характеристик (можливість формування сигналів складної форми, нерозривність фази під час перемикання з частоти на частоту, цифрове управління частотою, фазою і амплітудою вихідного колювання) на сьогодні застосовуються в системах зв'язку. Особливо перспективним є використання DDS у радіотехнічних системах передачі інформації з підвищеною захищеністю і шумостійкістю. Сьогодні ряд параметрів обчислювальних синтезаторів частотим менше, ніж у синтезаторів на основі фазових амплітудних перетворювачів частоти. Такими параметрами є низькі існування в спектра синтезованого сигналу гармонійних складових з високими значеннями амплітуд та показники короткочасної фазової стабільності. Один із напрямків поліпшення короткотимчасової фазової стабільності є використання опорних генераторів з покращеними кількісними характеристиками.

На сьогоднішній день застосовуються такі класифікації ОГ синтезаторів частот:

- Квантові стандарти частоти являють собою пристрої, в яких для генерування колювань з досить стабільною частотою або для точного вимірювання частоти колювань застосовують квантові переходи частинок (молекул, іонів та атомів) з одного енергетичного рівня на інший. Квантові стандарти прийнято поділяти на два класи.

В активних квантових стандартах частоти квантові переходи молекул і атомів безпосередньо призводять до випромінення електромагнітних хвиль, в яких частота _____ служить _____ стандартом _____ або ОЧ. Такі прилади називають квантовими генераторами. У пасивних квантових стандартах частоти, виміряна частота колювань зовнішнього генератора

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

порівнюється з частотою коливань, яка відповідає певному квантовому переходу обраних атомів, тобто з частотою спектральної лінії.

- Стандартні по часу і частоті – високостабільні по частоті джерела електромагнітних сигналів (оптичних або радіодіапазонних). Стандарти частоти використовуються як вторинні або робочих зразків в метрологічних вимірюваннях, також при виготовленні високоточних засобів вимірювальної техніки часу і простоти, в радіоастрономії, радіонавігації та в інших сферах.

Стандарти класифікують за матеріалом робочого тіла квантових генераторів (цезію, водню, кварцу, рубідію). Стандарти часу й частоти займають велику нішу в системах синтезу сигналів і частот в основному через свої енергетичні і масо-габаритні характеристики. Як виняток можна навести приклад опорного цезієвого стандарту фірми Simmetricom (США) Quantum SA.45s CSAC. який представляє собою квантовий стандарт частоти на основі атомів цезію.[6 с.23-25]

Генератори надвисоких частот застосовуються в діапазонах частот від 300 МГц до 100 ГГц. Стабілізування їх частоти генерації кварцовими резонаторами неможливо, тому вимоги до стабільності частоти знижують, або використовуються засоби фазової синхронізації частоти НВЧ - коливань, або застосовують інші типи стабілізуючих резонаторів.

Якість опорних НВЧ генераторів оцінюються додатковими параметрами, що характеризують вплив фази варіацій напруги живлення на частоту і коефіцієнтом на відображення від навантаження.

1.6. Тонко плівковий опорний генератор на об'ємно акустичних хвилях.

Використання тривіальних підходів для реалізації схеми ОГ, наприклад як ПАХ або кварцовий задавальний елемент, не забезпечує вимог стабільності, а також завдає проблеми при переналаштовуванні частот та призводить до обмеженого використання радіопристроїв, як наприклад, обмеження в багатоканальності.

Тим не менш системи, які застосовують сьогодні технологію бездротового зв'язку, працюють на частотах радіоканалу в діапазоні 0,43- 2,4 ГГц.

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

До таких мереж відносяться перш за все мережа GSM-1800 з частотою 1710 -1880 МГц , GSM-900 з частотою 890-960 МГц, Bluetooth з робочою частотою 2,4 ГГц, мережа Wi-Fi стандартом 802.11 b/g та інші. В найближчій перспективі плануються системи широкосмугового зв'язку з діапазоном 5,155 - 6,425 ГГц (наприклад, стандарти 802.16 b/e, що передбачають безпроводні WiMax мережі з робочими частотами 1,5 13,6 ГГц), в майбутній перспективі діапазон понад 10 ГГц. Спеціальні системи, такі як засоби радіоелектронної боротьби та радіолокація вже зараз працюють на частотах понад 10 ГГц.[7 с.12-13]

Для стабілізації та селекції частот таких систем потрібно мати певні акустoeлектронні компоненти, які забезпечують роботу в заданому НВЧ діапазоні частот і можливість їх інтеграції з напівпровідниковими структурами в одній мікросхемі.

Принципово нові можливості істотного підвищення робочої частоти акустoeлектронних приладів відкриваються у зв'язку з можливостями вирощування тонких плівок зі структурою анізотропного кристала, яка володіє п'єзоелектричними властивостями. Зокрема, такими властивостями володіє плівка AlN . Швидкість об'ємно-акустичної хвилі ОАХ в нітриді алюмінію досягає величини близько 11 км/с, яка при товщині плівки в 0,5 мкм відповідає частоті 11 ГГц. Дивлячись на те, що товщина плівки може бути менше 0,5 мкм, робоча частота може бути ще вище. Необхідно відзначити, що свій внесок в зниження частоти дає кінцева товщина електродів, але навіть з урахуванням цієї обставини робоча частота тонко плівкового резонатора на ОАХ може досягати величини, що перевищує 20 ГГц, що абсолютно недосяжне для пристроїв на ПАХ.

Для розробки НВЧ акустoeлектронних приладів необхідно використовувати багатошарові тонкоплівкові п'єзо-кристалічні структури, в яких товщина порівнянна з довжиною АХ.

За останній час були освоєні технології вирощування тонкоплівкових п'єзо-структур на основі окису, цинку, нітриду алюмінію та інших матеріалів, що мають товщини від 0,05 до 2 мкм.

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

На основі таких структур з'явилася можливість створювати НВЧ акустoeлектронні компоненти, які мають змогу працювати в діапазоні робочих частот від 2 до 30 ГГц. До таких компонентів перш за все відносяться НВЧ акустoeлектронні резонатори на основі орієнтованих тонкоплівкових п'єзо-структур з нітриду алюмінію, що вирощений на підкладках з кремнію. При цьому в якості робочої акустичної може бути використана ОАХ.

Найпростіша конструкція НВЧ тонкоплівкового акустoeлектронного фільтра складається з двох електродів, між якими знаходиться тонкий п'єзо-кристалічний шар. Резонансна частота визначається швидкістю акустичної хвилі і товщиною п'єзо шару. У першому наближенні центральна робоча частота тонкоплівкового резонатора оцінюється з найпростішого співвідношення (1.1)

$$f = v / (2h), \quad (1.1)$$

де, v - швидкість ОАХ вздовж напрямку, що перпендикулярний поверхні п'єзоактивного шару з (0001) AlN ($v \approx 11$ кг / с),

h - товщина шару.

На Рис. 1.2 показані діапазони робочих частот НВЧ тонкоплівкових акустoeлектронних фільтрів в залежності від товщини металевих електродів і п'єзоактивної плівки нітриду алюмінію.

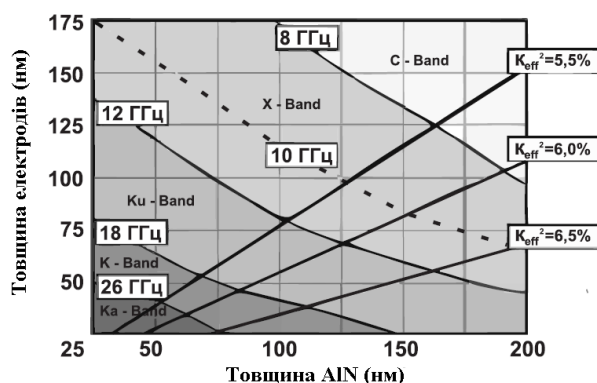


Рис.1.2 Діапазони робочих частот НВЧ тонко плівкових акусто-електронних резонаторів в залежності від товщини п'єзо-активної плівки AlN і металевих електродів

Виходячи з графіку видно, що для реалізації НВЧ діапазону робочих частот аж до 28 ГГц необхідно застосовувати дуже тонкі плівки як електродів резонатора, так і AlN . У одночастотних резонаторах для виділення центральної частоти необхідно акустично ізолювати тонкоплівкову структуру від підкладки. Така ізоляція може бути виконана двома методами. Перший – створення під структурою повітряного зазору. Такий резонатор називається тонко плівковий резонатор мембранного типу. Другий спосіб полягає у використанні структури, змонтованої на підкладці, в якій між резонатором і підкладкою поміщається акустичний відбивач, який служить для ізоляції акустичних коливань поза робочої області резонатора.[8 с.5-9]

Не дивлячись на те, що головним типом акустичної хвилі в таких пристроях є ОАХ, в структурі резонатора збуджується цілий набір акустичних хвиль різного типу. До таких хвиль відносяться хвилі Релея-Лемба, зсувні об'ємні акустичні хвилі ЗОАХ та інші., збуджуються в багатошаровій тонко плівковій структурі, що являється основою резонатора. Такі хвилі часто негативно впливають на параметри НВЧ акусто-електронних пристроїв, тому важливим завданням є аналіз та дослідження хвильових процесів, які відбуваються в багатошарових тонкоплівкових (товщина кожного шару менше довжини акустичної хвилі) п'єзокристалічних структурах.

Існує декілька видів конструкцій плівкових фільтрів, проте найкращий серед них є резонатор з Брегівським відбивачем (Рис. 1.3), що призначений для ізоляції тонкоплівкового відбивача від підкладки. Такі резонатори частіше за все виконані на основі плівок алюмінію та молібдену, а матеріалом п'єзо електричного шару застосовується оксид цинку.



Рис. 1.3 Резонатор з Брегівським відбивачем.

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			25

Додатково електроди резонатору виготовляються з алюмінію. Зазвичай застосовується п'ять пар шарів алюмінію і молібдену. На добротність, в свою чергу, сильно впливає шорсткість поверхні плівок алюмінію, що є низько імпедансним шаром резонатору і її підвищення небажане.[9 с.11-13]

Висновки.

В даному розділі було проаналізовані параметри та характеристики синтезаторів частоти. Представлено теоретичне аналіз та дослідження хвильових акустичних процесів в багатошарових п'єзокристалічних структурах на основі теоретичного матеріалу, а також числовий аналіз і оптимізація параметрів НВЧ тонко плівкових акустoeлектронних резонаторів ТАЕР на основі багатошарових тонкоплівкових структур, враховуючи п'єзошар з нітрату алюмінію AlN , працюючих в ГГц діапазоні частот.

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

РОЗДІЛ II. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

2.1. Типи акустичних хвиль, які розповсюджуються в багат шарових тонко плівкових структурах.

Акустoeлектронні пристрої являють собою принципово незамінні базові елементи для всіх перспективних систем засобів навігації, зв'язку, радіолокації, робототехніки і моніторингу. Вони дозволяють забезпечити обробку складних сигналів в реальному масштабі часу при широкому динамічному діапазоні, невисокою перешкодостійкістю та високій чутливості. Акустoeлектронні пристрої нового покоління допомагають освоювати більш високочастотні діапазони, споживають менше енергії, невисокою вартістю і відрізняються унікально малими масо-габаритними характеристиками.

Принцип роботи тривіальних кварцових резонаторів заснований на використанні ОАХ, що розповсюджуються в об'ємі п'єзокристалу. При цьому їх робочий частотний діапазон обмежується сотнями МГц, для збільшення частоти необхідно зменшити товщину об'ємного кварцу до одиниць мкм, що технічно реалізувати дуже важко.

У дисертації представлено аналіз та теоретичне дослідження хвильових акустичних процесів в багат шарових п'єзо-кристалічних структурах на основі математичного моделювання та вирішення хвильових рівнянь п'єзоакустики методом кінцевих елементів, а також числовий аналіз і оптимізація параметрів НВЧ тонкоплівкових акустoeлектронних резонаторів ТАЕР на основі багат шарових тонко плівкових структур, враховуючи п'єзо шар з нітрату алюмінію, що працюють в ГГц діапазоні частот.

З появою тонко плівкових резонаторів мембранного типу в електронних технологіях різко зріс інтерес до акустичних процесів, які виникають в багат шарових тонко плівкових п'єзо-кристалічних структурах, проте повністю вивченим це питання вважати не можна. У розділі будуть розглянуті акустичні та електроакустичні хвилі, які збуджуються в багат шарових тонко плівкових

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

структурах, що використовуються для конструювання на їх основі пристроїв по FRAB технології. Особливу увагу буде приділено об'ємним електроакустичним хвилям, що поширюються в тонких плівках, а також хвилях Релея - Лемба.[10 с.18-21]

Багатошарова тонкоплівкова п'єзо кристалічна структура являє собою набір тонких плівок, товщина яких менша, ніж довжина акустичної хвилі в матеріалі шару. Причому необхідною умовою є наявність в структурі плівки з діелектричного матеріалу, яка володіє п'єзоефектом. Акустичні хвилі в такій структурі мають більш складну структуру, ніж акустичні хвилі, що розповсюджуються в скінченних середовищах.

Хвильові явища у середовищах з яскраво вираженою анізотропією ряду фізичних властивостей характеризуються більш складними закономірностями у порівнянні з хвильовими явищами в ізотропних середовищах. Наявність п'єзоефекту призводить до того, що електричні і механічні значення перестають бути незалежними. Якщо тіло володіє п'єзоелектричними властивостями, то деформації, що створюються пружною хвилею, призводять до появи локальних електричних полів. Якщо поля поширюються разом з механічною хвилею, також можуть виходити за межі п'єзоелектричного середовища. При цьому електромагнітні поля, які збуджені під дією акустичної хвилі, взаємодіють з будь-якими металевими електродами, які розташовані на поверхні середовища, хвиля в яких розповсюджується.

Це дозволяє впливати на хвилю, впливаючи на електромагнітні поле які пов'язані з нею. Як приклад, в багатьох роботах описана конструкція акселерометра, яка працює за принципом закоротки електричного поля металевою мембраною, в основі якого лежать лінії затримки на поверхневих акустичних хвилях. Властивості акустичних хвиль, що розповсюджуються в п'єзокристалах (на відміну від ізотропних середовищ) мають ряд суттєвих особливостей. По-перше, параметри і структура хвилі залежать від напрямку симетрії і поширення п'єзокристалу.

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

Електроакустичні хвилі мають не одну чи дві (як в ізотропному середовищі), а всі три компоненти вектору механічних зміщень U_1, U_2, U_3 а коливання відбувається в одній площині, тобто електронно-акустичні хвилі плоскою поляризовані. При цьому вектори фазової (2.1) та групової (2.2)

$$V = a / k \quad (2.1)$$

$$V = dw/dk \quad (2.2)$$

швидкостей не співпадають (w - частота, k - хвильовий вектор).

Це означає, що фаза та енергія хвилі в загальному випадку можуть поширюватися в різних напрямках.

Як відомо, акустoeлектронні пристрої нового покоління, які працюють в діапазоні частот від 2 до 30 ГГц, в якості робочого типу акустичних хвиль використовують ОАХ, які розповсюджуються в багатошарових тонко плівкових структурах. До таких пристроїв насамперед належать НВЧ акустoeлектронні тонкоплівкові резонатори.[11]

Залежно від конструкції, до складу багатошарової структури тонкоплівкового акустoeлектронного фільтра на об'ємних акустичних хвилях можуть входити від 3 до 15 шарів. При цьому матеріальні властивості кожного шару кардинально відрізняються між собою. Крім цього, поперечні розміри кожного шару кінцеві, а форма може бути досить складною. Це призводить до того, що в залежності від конструкції, в багатошаровій структурі може збуджуватись цілий набір хвиль різного типу: зсувні і поздовжні хвилі, різні види ПАХ, хвилі Лемба, хвилі Сезава, хвилі Стоунлі, хвилі Лява.

2.2. Поверхнево акустичні хвилі.

Поверхневі акустичні хвилі – це пружні хвилі, які розповсюджуються уздовж границі між двома дружніми середовищами або уздовж вільної поверхні твердого тіла. Залежно від граничних умов, поверхневі акустичні хвилі бувають декількох типів. Розрізняють поверхневі хвилі вертикальної (хвилі Релея, Стоунлі, електроакустичні хвилі Гуляєва-Брюстейна) і горизонтальної поляризації (хвилі Ліва).[12 с. 649-650]

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

У випадку п'єзокристалічної підкладки поверхнево акустичних хвиль супроводжується квазістичним електричним п'єзополем. Внаслідок цього поверхнево акустичні хвилі можна збуджувати на поверхні п'єзокристала, створюючи електричне поле в тонкому при поверхневому шарі п'єзокристала за допомогою системи металевих електродів (зустрічно-штирьового перетворювачі ЗШП), нанесених на його поверхню. На Рис. 2.1 показана декартова система координат, в якій в напрямку осі x_1 поширюється акустична хвиля. На осі x_3 нормаль до поверхні п'єзо кристалу.

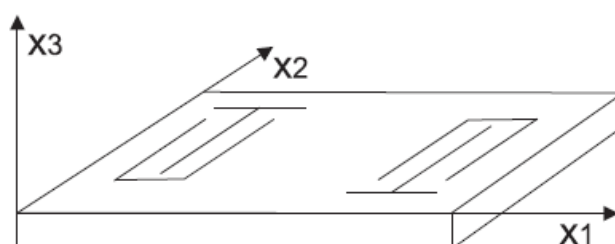


Рис 2.1. Робоча система координат.

ПАХ - це хвилі, вектор групової і фазової швидкості яких паралельна поверхні, але, в загальному випадку, ці вектори можуть не співпадати по напрямку. Залежно від класу симетрії п'єзо кристалу і напрямку поширення хвилі, можуть існувати кілька типів п'єзо акустичних хвиль.

Спеціальним типом хвиль являються електроакустичні хвилі Лемба, які розповсюджуються в тонких п'єзо кристалічних пластинах. За характером вони схожі з ПАХ, але, за рахунок невеликої товщини пластинок, коливання розповсюджуються по всій поверхні пластини цілком, тому термін «поверхневі хвилі» до них не застосовується. Часто, в роботах використовують загальне позначення хвилі Релея-Лемба, оскільки ці хвилі мають схожу природу.[13 с.14-19]

2.3. Хвилі Лемба.

Хвилі Лемба — особливий тип хвиль, що поширюються в пружних хвилеводах. Хвилі названі ім'ям першого вченого Горація Лемба, що знайшов дисперсійне співвідношення для цих хвиль і опублікував його в 1917 році.

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

Хвилі Лемба діляться на два основних типи – симетричні і антисиметричні. Якщо умовно провести повздовж поверхні пластини, в якій розповсюджуються хвилі, площина, яка розділяє пластину навпіл, то в симетричних хвилях Лемба зміщення будуть симетричними відносно площини, тобто зміщення U_x будуть мати однаковий знак, а U_z – інший, а антисиметричне зміщення U_x будуть мати протилежний знак, а U_z – однаковий. В залежності від товщини пластини, в ній можуть розповсюджуватись різна кількість хвиль Лемба з різними фазовими і груповими швидкостями, тим паче чим більше відносна товщина пластини, тим більша кількість хвиль може бути розповсюджена в ній. Іншими словами, швидкість хвилі Лемба залежить від h/λ . При прагненні величини h/λ до одиниці, швидкість поширення хвиль прагне до швидкості ПАХ.[14 с. 63-64]

В тонких п'єзоелектричних середовищах хвилі Лемба можуть бути збуджені і підсилені за допомогою електричного струму. Хвилі такого типу можуть поширюватися в пластині п'єзо кристалу кінцевої товщини h , порівняно з довжиною хвилі λ . На відміну від хвилі Лемба, що розповсюджується в ізотропній пластині, дана хвиля супроводжується електричним потенціалом ϕ . Енергії цієї хвилі, на відміну від ПАХ, зосереджена у всій товщині h пластини. У загальному випадку електроакустична хвиля Лемба має всі три компоненти механічних зсувів U_1, U_2, U_3 . Однак, в деяких одиничних випадках симетрії кристала, також, як і в ізотропній пластині, дана хвиля може бути вертикальної або горизонтальної поляризації. Фазові швидкості мод Лемба можуть бути як більше, так і менше швидкості ПАР в даному середовищі.

Числове та фізичне моделювання акустичних хвиль, які поширюються в багатошарових тонко плівкових (товщина шару менше довжини акустичної хвилі) п'єзо кристалічні структури на основі нітрату алюмінію, нітрату галію і розрахунок їх основних характеристик призведе до створення нових класів приладів акусто-електроніки і п'єзо електроніки, працюючих на частотах в діапазоні від 2 ГГц до 30 ГГц.[15 с.123]

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

2.4. Тип робочих хвиль в тонко плівковому резонаторі мембранного типу.

Основним типом робочих акустичних хвиль в тонкоплівкових резонаторах мембранного типу є об'ємно акустична хвиля. Через кінцеві поперечні розрізи електродів резонатора зсувних об'ємно акустичних хвиль збуджується одночасно з поздовжньою хвилею. У плівкових резонаторах мембранного типу резонатори можуть збуджуватися також модами Лемба. У плівкових резонаторах мембранного типу на кордонах між шарами існують умови для збудження хвилі Лява, Сєзава, Стоунлі а також, за певних умов, пов'язаних перш за все з проблемами технологічного процесу, можуть виникнути відмінності різного роду, що впливають з щільних хвиль. Всі перераховані вище акустичні хвилі можуть вплинути на якісні характеристики пристрою.

Чисельне моделювання і аналіз хвильових процесів, прохідних в багат шаровій тонкоплівковій структурі, що є основою НВЧ акустoeлектронного тонкоплівкового фільтра необхідні для оптимізації цієї конструкції та досягнення поліпшених параметрів пристрою. В ході роботи були проведені пошуки аналіз методів розрахунку параметрів, а також виявлено їх плюси та мінуси.

2.5. Аналіз фізичних та конструктивних фактори, які впливають на основні характеристики акусто-електронних резонаторів.

Всі фактори, які мають вплив на добротність акустoeлектронних резонаторів, можна умовно розподілити на 2 групи. До першої належать фактори, які властиві всім конструкціям акустoeлектронних резонаторів на ОАХ. До них відносяться:

- витік акустичної енергії на кордонах елементів конструкції резонаторів;
- різні ефекти термопружного розсіювання;
- омічні втрати електродів.

Крім цих механізмів втрат для резонаторів можна виділити ще, як мінімум, 3 специфічних механізми:

- неповне придушення втрат енергії в стоці брегівського відбивача, як наслідок, дисипації частини енергії в підкладці резонатора;

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

- резистивні втрати в підвідних з'єднаннях, обумовлені особливостями конструкцію і призводять до паразитарних ємностей зв'язках із стоком акустичного відбивача;
- наявність втрат в матеріалах, використовуваних в стоці брегівського відбивача.

Починаючи з найпростіших пристроїв додатковим механізмом втрат пояснюється той факт, що добротність резонатора мембранного типу в загальному випадку вище, ніж добротність резонатора з акустичним відбивачем, якщо інші їх параметри, такі як якість матеріалів, товщини шарів, та інші.

Як було описано вище в попередньому розділі, під дією НВЧ сигналу виникають не тільки поздовжні об'ємні хвилі, які є робочими для даного типу резонаторів, але також інші типи хвиль. Перш ніж приступати до оцінки добротності, необхідно зробити відступ з метою описання джерела і, як наслідок наявності модів Релея-Лемба (R-L) в акустичних пластинках. Це важливо тому, що є сильна присутність R-L в високо добротних тонко плівкових резонаторах.

Ці моди поширюються уздовж поперечних напрямків та утворюють сильний резонанс в присутності 2 паралельних країв в конструкції резонатора. Крім впливу резонансних процесів на амплітудо-частотні параметри пристрою, на порушення будь-яких акустичних хвиль витрачається енергія, яка веде до зниження добротності пристрою, якщо цю енергію не зберегти.

Окрім перерахованих факторів впливу, існують деякі специфічні фактори для тонкоплівкових резонаторів. Для локалізації акустичної енергії всередині п'єзоелектричної плівки в пристроях такої конструкції застосовується брегівськими відбивач з шарами товщиною $\lambda/4$ з матеріалів, з істотно відмінними акустичними імпедансами. Це тягне за собою декілька проблем.

Перш за все, в шарах брегівського відбивача відбувається загасання акустичної хвилі. З іншого боку, для повного відображення поздовжньої акустичної хвилі потрібне точне дотримання товщини брегівського відбивача. Однак на практиці неможливо забезпечити абсолютний контроль товщини і якості матеріалів. Завжди має місце деяка технологічна похибка, тому частина енергії об'ємних акустичних хвиль просочується крізь брегівськими відбивач в підкладку

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

і загасає в ній.[15 с.118-121]

Якщо в шарах, крім діелектричних шарів присутні металеві, то можлива поява ще додаткових механізмів втрат, що виникають за рахунок часткового замикання електродів акустoeлектронного резонатора через ємність на металеві шари брегівського відбивача.

Всі перераховані проблеми можна умовно розділити на 2 види. Одні вимагають поліпшення і модернізації технології виробництва, інші ж можна в деякій мірі вирішити за рахунок попереднього аналізу в оптимізації конструкції.

2.6. Вплив матеріалів електродів на добротність.

В разі, якщо товщина електродів нескінченно мала, добротність резонатора прямує до механічної добротності Q_m матеріалу п'єзoeлектричної плівки. Однак на практиці товщина реальних електродів має скінченну величину нерівну 0.

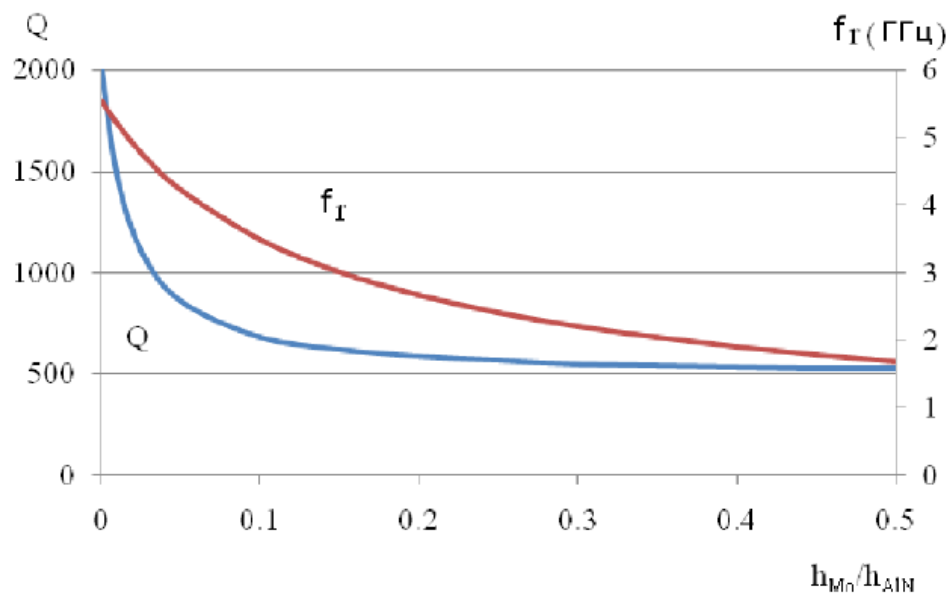


Рис. 2.2. Залежність добротності резонатора (вісь Q) від відносини товщини одного Mo електрода (обидва електроди однакові по товщині) до товщини шару AlN , залежність резонансної частоти резонатора (вісь h) від товщини електрода для фіксованої товщини шару AlN , що дорівнює 1 мкм

Оскільки акустична хвиля поширюється як в електродах так і в п'єзоплівці, то механічна добротність матеріалу електродів дає свій вклад в повну добротність резонатора. Видно, що Q_m металів менше, ніж Q_m п'єзокристалів. Тому

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

добротність резонатора повинна бути менше, ніж механічна добротність однієї лише п'єзоплівки. Наприклад якщо, матеріал електродів взяти молібден (один з найбільш часто використовуваних матеріалів) і задати для нього величину механічної добротності $Q_m = 500$, яка укладається в діапазон наведених вище значень – розрахункова залежність добротності резонатора від відносної товщини одного з двох однакових електродів буде виглядати так, як показано на Рис. 2.2.

Зі збільшенням ширини електродів добротність резонатора швидко зменшується від 2000, яка відповідає механічній добротній нітриду алюмінію, до 500, що відповідає механічній добротності молібдену. Тут же наведена крива, яка показує те, що збільшення товщини електродів супроводжується також і суттєвим зменшенням центральної частоти пристрою. Таким чином, хороші акустичні властивості (малі акустичні втрати) нітриду алюмінію не можуть бути реалізовані в повній мірі через значно гірших акустичних властивостей матеріалів електродів. [16 с.34-36]

Вплив електродів тим більше, чим вище робоча частота пристрою. На графіку видно, що (Рис. 2.3) наведені розраховані резонансні частоти пристроїв в залежності від товщини нітриду алюмінію для різної товщини електродів. При розрахунку параметрів акустoeлектронних резонаторів за допомогою чисельного вирішення основних рівнянь п'єзоакустики використовуються матеріальні константи матеріалів, з яких формується пристрій розроблений таким чином. Однак значення матеріальних констант в різних джерелах можуть дещо різнитися. Ця закономірність дозволяє розраховувати параметри пристрою. Наприклад, в різних джерелах можна знайти значення щільності ρ для Mo від 9,01 до 10,2 г/м³. На рисунку 3.3 наведені графіки залежності провідності резонатора $[Y]$ від частоти, розраховані для мембранного резонатора з електродом з молібдену, де для розрахунку кривої (1) використана щільність молібдену становила $\rho = 9,01$ г/м³, а для іншої $\rho = 10,01$ г/м³.

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

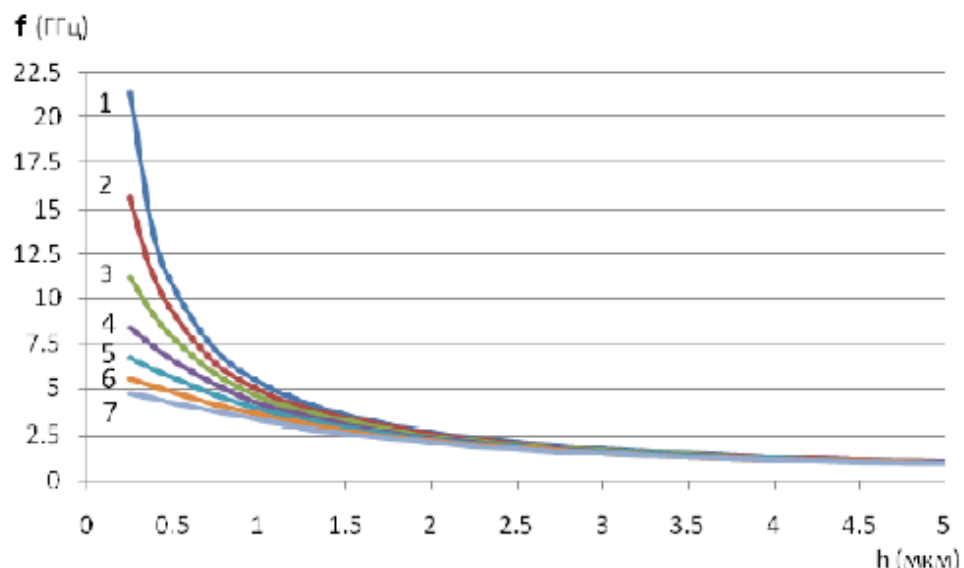
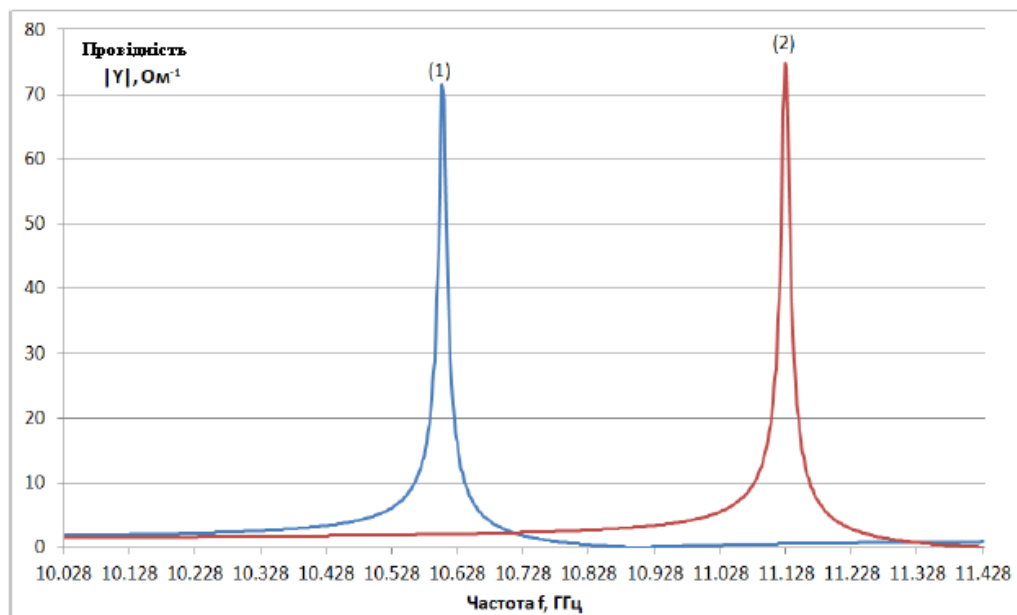


Рис 2.3 Розраховані залежності частоти резонатора від товщини AlN для різної товщини електродів: (1) - $h_e = 0$ мкм; (2) - $h_e = 0,05$ мкм; (3) - $h_e = 0,1$ мкм; (4) - $h_e = 0,15$ мкм; (5) - $h_e = 0,2$ мкм, (б) - $h_e = 0,25$ мкм, (7) - $h_e = 0,3$ мкм.

Як видно з графіків, центральна частота через різницю щільності в 1 г/м^3 для десяти ГГц резонатора може досягти $0,5 \text{ ГГц}$. Також помітна різниця в значення модуля імпедансу пристрою на резонансній частоті. Така відмінність закономірна, оскільки від щільності залежить швидкість акустичної хвилі в матеріалі.

Не тільки акустичні властивості матеріалів шарів (їх механічна добротність), що утворюють резонатор, визначають його добротність. На величину добротності сильно впливають також і електричні резистивні втрати, обумовлені омичним опором електродів і підвідних доріжок. При товщині порядку сотень нанометрів

такі контактні майданчики будуть мати деякий, відмінне від нуля, омичні опори. Опори підходящих опорів сигнального електроду вносить свій внесок в імпеданс резонатора в якості активного опору. В еквівалентній схемі тонко плівкового резонатору омичні втрати в контактній площадці сигнального електроліту можна врахувати за допомогою елемента R_s , (Рис. 2.3). Як видно, чим вище резонансна частота, тим сильніше падає добротність при збільшенні омичного опору контактних майданчиків в сигнального електрода.[17 с.15-18]

При конструюванні реального резонатора доводиться шукати компроміси, так як, з однієї сторони, чим ширше імпеданс, тим більше падає добротність резонатора за рахунок акустичних втрат, а з іншого боку при зменшенні товщини електроду збільшується його омичний опір. Один із виходів з даної ситуації є перехід на матеріали з хорошою акустичною добротністю і малим питомим опором.

2.7. Вплив технологічних похибок на основні параметри акусто-електронних резонаторів.

Ширина електрода значно впливає на центральну частоту резонатора, нарівні з товщиною плівки п'єзоелектрика. Чим вище частота резонатора, тим точніше необхідно контролювати товщину металевої плівки при напиленні. При рівномірному збільшенні ширини електрода, робоча частота резонатору зменшується, проте пристрій продовжує працювати в одновимірному режимі. Основні способи підгонки частоти резонатора, що працює на об'ємних акустичних хвилях, засновані саме на зміні товщини електрода.

Часто при виробництві резонатора, а саме при формуванні плівок п'єзоелектрика або електродів, напилення проходить нерівномірно, і площа зовнішньої поверхні електрода перестає бути паралельна поверхні акустичної плівки. В цьому випадку відбувається формування стоячих хвиль з частотами, які відрізняються на невелику величину, а резонатор починає працювати в багатомодовому режимі. Для ілюстрації даного ефекту була розрахована модель за допомогою МСЕ.

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

За основу була взята модель, що описана раніше (рис. 2.12), однак товщина нижнього електроду в одному з кутів вища товщини інших на 10нм. Це становить близько 10% від товщини нижнього електроду. Таким чином, нижня межа нижнього електроду знаходиться під кутом $\approx 0,5^\circ$ до площини верхньої межі електроду і площині п'єзо плівки.

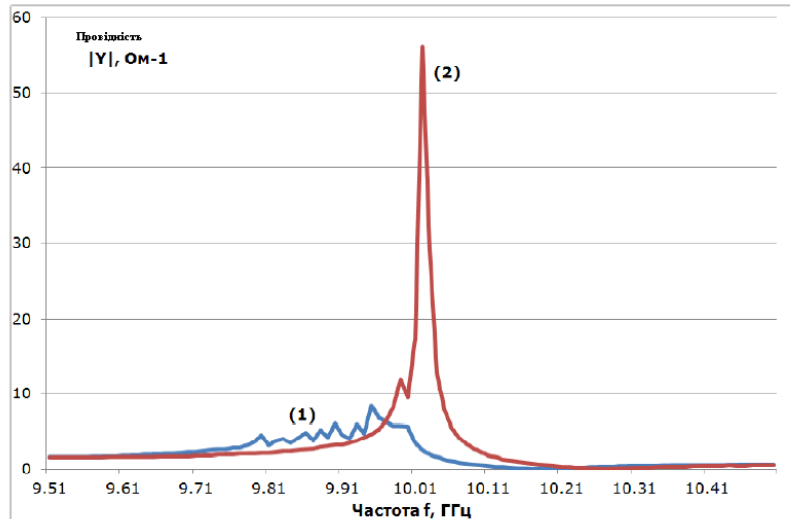


Рис.2.4 Графік залежності провідності від частоти

На рис. 2.4 показаний графік провідності в залежності від частоти. Як видно з рис. 2.4, така нерівномірність приводить до зниження величини провідності і отримання паразитних резонансів в порівнянні з випадком рівного електроду (Рис. 2.5).

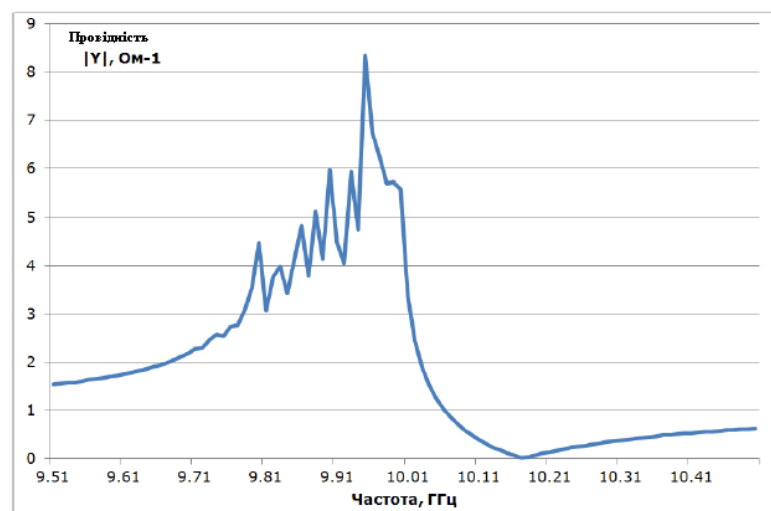


Рис. 2.5 Графіки залежності провідності $|Y|$ (1) – електрод під кутом , (2) – рівний електрод

При невеликому розходженні розрахунок ідеальної товщини шарів дзеркала з реальним сформованим стеком, відбивання об'ємних акустичних хвиль відбувається неповністю.

Висновки

Елементи конструкції та тип хвиль які застосовуються в тонкоплівковому акустoeлектронному резонаторі значно впливають на головні параметри пристрою. Робоча частота такого резонатора в загальному випадку визначається товщиною електродів, п'єзоплівки та швидкістю поширення ОАХ. Вплив конструкції на інші характеристики та параметри резонатора значно складніше і вимагає додаткових дослідження.

В дисертації представлений один з найреальніших способів покращення конструкції тонкоплівкових акустoeлектронних резонаторів на об'ємно акустичних хвилях з точки зору поліпшення основних параметрів пристрою.

РОЗДІЛ III. КОНСТРУКТОРСЬКО – ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

3.1. Основні параметри акусто-електронних резонаторів.

На робочі характеристики тонкоплівкового надвисокочастотного акустелектронного резонатора, такі як добротність і робоча частота, впливають багато факторів, які залежать від конструктивних параметрів пристрою та якості матеріалів які використовуються при виготовленні. Такі фактори можна розподілити на дві групи по їх природі: електричні та акустичні. Для аналізу кожної групи із цих факторів потрібно застосовувати окремі методи. Для покращення дослідження хвильових процесів в тонкоплівкових акустичних резонаторах необхідно використовувати методи теоретичного аналізу хвильових рівнянь п'єзоакустики, які дозволяють вирахувати технічні характеристики резонаторів.

Електромагнітний вплив елементів конструкції може бути досліджений за допомогою еквівалентних схем.

Ключовою характеристикою резонатора є резонансна частота. У будь-якого резонатора розрізняють дві резонансні частоти: частоту паралельного резонансу f_p і частоту послідовного резонансу f_s . Для високо добротних резонансів ці частоти практично не розрізняються. Частоті f_s . Відповідає максимум модуля провідності $|F|$ або мінімум модуля імпедансу $|Z|$, f_p - навпаки. З математичної точки зору частоті f_s відповідає власна частота резонатора за умови коротко замкнутих електродів, з іншого боку f_p - власна частота резонатора за умови розімкнених електродів. [19]

Будь-який реальний коливальний процес завжди супроводжується втратами енергії. Поруч з омичними втратами, що пов'язані з кінцівкою товщини металевих електродів, основний механізм втрат пов'язаний з тим, що разом з робочим типом коливань (як правило, це ОАХ), в резонаторах може відбуватися цілий ряд коливань, що призводять до зменшення добротності резонатора. До таких коливань, для резонатора на ОАХ, відносяться перш за все зсувні об'ємні АХ, хвилі Релея-Лемба та ін.

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

Втрати енергії кількісно характеризуються коефіцієнтом загасання або добротністю. Ці дві величини пов'язані однозначним співвідношенням. Чим більше коефіцієнт загасання, тим менше добротність (і навпаки).

В загальному вигляді добротність – це відношення повної енергії, що зберігається в резонаторі W_r , до енергії, розсіяною W_a в резонаторі за період коливання:

$$Q = 2\pi \frac{W_r}{W_a}, \quad (3.1)$$

З іншого боку добротність – це властивість коливальної системи, яка визначає частотну смугу резонансу. Ця властивість широко застосовується для визначення добротності за експериментальними параметрами. Для електричного ланцюга набагато простіше виміряти амплітуду (напруги або струму), ніж потужність або енергію. Так як енергія і потужність пропорційна квадрату амплітуди осциляції, смуга на амплітудно частотній характеристиці становитиме $\frac{1}{\sqrt{2}}$ від піку, (приблизно на рівні -3 Дб). Однак існують й інші способи визначення добротності, про які буде розказано нижче.

В резонаторах на АХ втрати в першу чергу обумовлені загасанням акустичної хвилі, яка розповсюджується в матеріалах шарів, що утворюють резонатор. Математично загасання хвилі обумовлюється наявністю уявної частини в швидкості поширення хвилі. Швидкість хвилі в твердому середовищі визначається матеріальними константами даного середовища (коефіцієнтом щільністю і пружності головним чином). Якщо при вирішенні хвильових рівнянь додати хоча б в одну з цих констант невелику уявну частину – уявна частина швидкості хвилі з'явиться автоматично. Так зазвичай відбувається при теоретичному описі хвильових процесів в тонкоплівкових резонаторах. Уявна частина звичайно становить невелику частку від реальної частини, цю частку в літературі зазвичай прийнято вводити, що дорівнює приблизно $\frac{1}{Q_m}$ "+, де значення Q_m , – механічна добротність матеріалу. Величини механічної добротності деяких матеріалів, що зазвичай застосовуються при конструюванні тонкоплівкових резонаторів на ОАХ.

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

Таким чином, теоретична гранична величина добротності одно-частотного тонко плівкового акусто-електронного резонатору, в якому в якості активного п'єзоелектричного шару використовується нітрид алюмінію, визначається механічною добротністю цього матеріалу і в різних джерелах становить від 1500 до 2500 в залежності від особливостей технологічного процесу нанесення тонкої плівки AlN і від товщини цієї плівки (тобто від частоти, для якої призначений резонатор). Але численні фактори, присутні в будь-якій реальній конструкції резонатора, що не поз-воля досягти граничного теоретичного значення. На частотах 1 - 2 ГГц величина добротності досягає 1000 - 1500. З підвищенням частоти до 10 ГГц і вище добротність, що отримується експериментально, знижується до двохсот в кращих випадках.[20]

Недивлячись на це, є можливість виробити тонко плівковий акустоелектронних резонатор з високою добротністю порядку $10^4 - 10^5$. Для цього необхідно помістити резонатор на підкладку з матеріалу відповідною величиною механічної добротності (наприклад, лейко-сапфір Al_2O_3) із забезпеченням (а не запобіганням) акустичного контакту резонатора з підкладкою (така конструкція називається НВАР). В даному випадку висока механічна добротність підкладки сприятиме збільшенню добротності всього резонатора. Але наявність акустичного контакту з товстої підкладкою неминуче супроводжується багатомодовістю, тобто в частотному спектрі резонатора є багато резонансів, близько розташованих один до одного по частоті. Для звичайних радіотехнічних додатків багатомодовість неприпустима, тому в FBAR резонаторах активна область акустично ізолювані від підкладки або акустичним відбивачем, або повітряної підкладки.

Одним з найбільш об'єктивних якісних характеристик акустоелектронних резонаторів є показник якості FOM (3.2).

$$FOM = k_{eff}^2 Q, \quad (3.2)$$

де, k_{eff}^2 - ефективний коефіцієнт електромеханічного зв'язку, Q – добротність резонатора, що залежить від конкретної конструкції резонатора та застосовуючи в резонаторі матеріалів.

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

Чим вище величина FOM, тим якіснішим за своїми параметрами вважається резонатор. Величина k_{eff}^2 визначається якістю (кристалічністю) активного п'єзо шару в резонаторі, а також співвідношенням товщини п'єзо шару і товщини електродів резонатора. Для визначення одного з найважливіших параметрів резонатору – ефективного коефіцієнта електромеханічного зв'язку – використовуються частоти паралельного f_p і послідовного f_s резонансу:

$$FOM = \frac{\pi f_s}{\pi f_p} \left[\tan \left(\frac{\pi f_s}{2 f_p} \right) \right]^{-1} \approx \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \frac{f_s}{f_p} \frac{f_s - f_p}{f_s}, \quad (3.3)$$

Можна відзначити, в деяких публікаціях множник $\frac{f_s}{f_p}$ в правій частині (3.3) відсутній, який дає менш точне та кілька завищене значення в порівнянні з точним варіантом формули (3.3).

При будь-якій зміні температури резонатора в загальному випадку незмінно змінюється його центральна частота. Зміна частоти кількісно характеризується температурним коефіцієнтом частоти:

$$TCF = \frac{1}{f_r} \frac{df_r}{dT}, \quad (3.4)$$

де, T - температура, f_r - резонансна частота.

Застосовувана методика дозволяє при обчисленні температурного коефіцієнта частоти користуватись виразів (3.4) безпосередньо. Для цього центральна частота визначається викладеним вище способом для трьох значень температури – для T , $T - \Delta T$ і $T + \Delta T$, де ΔT – невелика зміна температури, наприклад $0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$. Потім за цим значенням за допомогою числового диференціювання визначається температурний коефіцієнт частоти:

$$TCF = \frac{1}{f_r(T)} \frac{f_r(T+\Delta T) - f_r(T-\Delta T)}{2\Delta T} \quad (3.5)$$

Вплив температури на резонансну частоту обумовлено трьома основними причинами:

1. Зміна щільності матеріалу.
2. Зміна товщини шару.

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

3. Зміна матеріальних констант середовища (компонентів тензорів пружних, п'єзоелектричних і діелектричних постійних).

Формально можна записати в такому вигляді:

$$TCSF = TCSF_c + TCSF_\rho + TCSF_h, \quad (3.6)$$

де, $TCSF_c, TCSF_\rho, TCSF_h$ – складові температурного коефіцієнта частоти, що обумовлені тільки першою, другою і третьою причинами відповідально.

Описані методики розрахунку дозволяють легко враховувати впливав температури на резонансну частоту через перераховані три фактори, як окремо, так і через все в сукупності (і навіть через кожну комбінацію з двох факторів).

Температурні зміни матеріальних констант описуються відповідними температурними коефіцієнтами цих констант. Зміна щільності виражається через набір лінійних коефіцієнтів теплового розширення за всіма трьома просторовими координатами (або через один коефіцієнт об'ємного теплового розширення). Зміна товщини описується коефіцієнтом лінійного теплового розширення вздовж напрямку товщини.[21 с. 14-22]

В ідеальному випадку необхідно досягти кращих значень всіх перерахованих числових параметрів резонатора, але на практиці часто при поліпшенні одних характеристик погіршуються інші. При цьому які саме параметри важливі для конкретного пристрою визначається сферою його застосування. Використовуючи методи розрахунку основних параметрів резонатора, описані далі, можна оптимізувати конструкцію таким чином, щоб досягти прийнятних для конкретного пристрою характеристик.

3.2. Методика та алгоритми розрахунку основних параметрів акустоелектронних резонаторів.

Для виявлення методу моделювання акустоелектронних тонкоплівкових резонаторів, який би дозволяв найбільш точно розраховувати основні параметри пристрою по заданій конструкції, був проведений порівняльний аналіз основних теорій і способів розрахунку.

На даний момент існують три основні методи теоретичного уявлення багатопшарового тонкоплівкового акустоелектронні резонатора на ОАХ – це

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

представлення за допомогою еквівалентної схеми, за допомогою відрізків передавальних ліній і розрахунок шляхом вирішення системи рівнянь п'єзоакустики, які описують хвильові процеси у всіх шарах конструкції.

Чисельний розрахунок шляхом вирішення системи рівнянь п'єзоакустики, що описують хвильові процеси у всіх шарах конструкції, може бути виконаний як в одновимірному поданні (модифікована теорія Бенеша і Навотного) так і в 3-D поданні, використовуючи при цьому метод скінченних елементів (МСЕ).

3.3 Еквівалентна схема генератора на ОАХ.

Еквівалентна схема базової моделі Батерворта-ван Дайка містить тільки чотири елементи (Рис. 3.1).

На Рис.3.1 C_0 - статична ємність резонатора, як є реальною фізичною величиною. Її можна як вимірати, так і розрахувати діелектричними властивостями шару (шарів) між електродами і по геометрії активної зони пристрою (відстань між електродами, площею). Величини R_m , C_m , L_m – еквівалентні динамічний опір, ємність і індуктивність резонатора відповідно, які моделюють його резонансні властивості. Це саме еквівалентні величини, неіснуючі реально, тому їх неможливо визначити в рамках самої моделі. Витягти ці значення можна тільки шляхом порівняння графіка провідності даної схеми з графіком провідності резонатора, що отримано експериментально, або за допомогою більш точної теоретичної моделі.

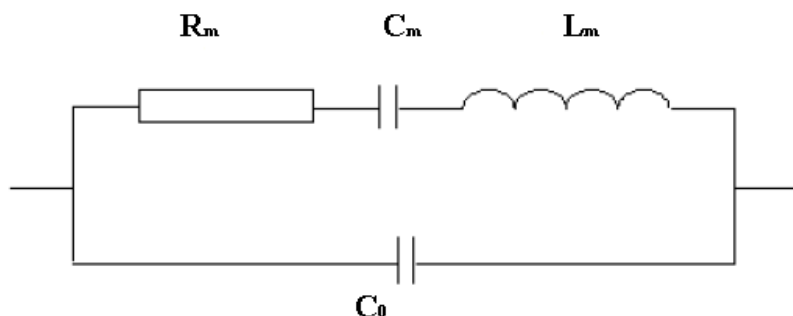


Рис 3.1: Еквівалентна схема базової моделі Батерворта - ван Дайка

Провідність еквівалентної схеми, зображеної на Рис. 3.1, на частоті $\omega = 2\pi f$ можна вирахувати за допомогою співвідношення:

$$Y_{BV D} = (R_m + \frac{1}{j\omega C_m} + j\omega L_m)^{-1} + j\omega C_0 = (Y_{BV D})_{Re} + j(Y_{BV D})_{Im} \quad (3.7)$$

Уявна і дійсна частини провідності розраховуються наступним чином:

$$(Y_{BV D})_{Re} = \frac{R_m}{(\frac{1}{\omega C_m} - \omega L_m)^2 + R_m^2}, \quad (3.8)$$

$$(Y_{BV D})_{Im} = \frac{\frac{1}{\omega C_m} - \omega L_m}{(\frac{1}{\omega C_m} - \omega L_m)^2 + R_m^2} + \omega C_0. \quad (3.9)$$

Типовий вид залежностей від частоти дійсної і уявної частини провідності, отриманих за формулами (3.8), показаний на рис. 3.2.

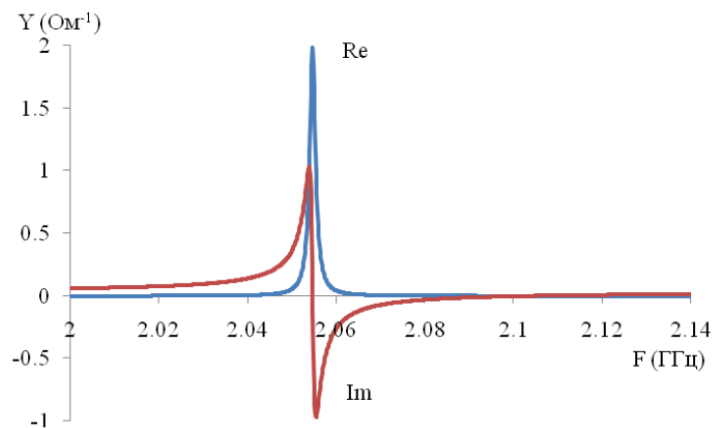


Рис 3.2: Залежності дійсної і уявної частин провідності еквівалентної схеми (Рис. 2.1) від частоти для наступних значень параметрів схеми: $R_m = 0,5 \text{ Ом}$, $C_m = 0,12 \text{ пФ}$, $L_m = 0,05 \text{ мкГн}$, $C_0 = 2,5 \text{ Пф}$.

На частоті:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_m C_m}}, \quad (3.10)$$

дійсна частина провідності має максимум:

$$[(Y_{BV D})_{Re}]_{max} = \frac{1}{R_m}, \quad (3.11)$$

Уявна частина динамічної провідності (без ωC_0) на цій частоті дорівнює нулю.

Цю частоту називають частотою після-послідовно резонансу або резонансною частотою. Частоту, при якій сумарна уявна частина провідності (включаючи ωC_0) проходить через нуль від низу до верху називають анти резонансною частотою або частотою паралельного резонансу. Для малих значень опору R_m частота паралельного резонансу розраховується за формулою:

$$\omega_p = \omega_s \sqrt{1 + \frac{C_m}{C_0}}, \quad (3.12)$$

Абсолютна величина провідності на частоті паралельного резонансу - мінімум, а на частоті послідовного резонансу має максимум. Абсолютна величина імпедансу $Z_{BV D} = 1 / Y_{BV D}$ - навпаки, проходить через мінімум на частоті послідовного резонансу ω_s , і через максимум на частоті паралельного резонансу ω_p . [21 с.13-29]

Знаючи частоти послідовного і паралельного резонансів за формулою (3.3), можна визначити ефективний коефіцієнт електромеханічного зв'язку. Для залежностей, показані на Рис. 3.2, $f_s = 2,0547$ ГГц, $f_p = 2,1034$ ГГц і $k_{eff}^2 = 0,0558$ (часто дана величина вказується у відсотках, яка в даному випадку відповідає 5,58%).

У досить вузькій смузі частот, поблизу резонансу, залежність уявної і дійсної частин провідності реального резонатора на ОАХ дуже схожі на залежності, показані на рис. 2.2. Це дає можливість визначити параметри еквівалентної схеми R_m , C_m , L_m і C_0 , по кривих залежностей уявної та дійсної частини від частоти, отриманими будь-яким способом. Це дозволяє використовувати дану еквівалентну схему в якості доповнення до других теорій, яка дозволяє отримати ці криві, а також будувати еквівалентну схему макета резонатора виходячи з експериментальних даних.

Визначивши з графіка максимальне значення активної провідності, можемо отримати еквівалентний динамічний опір R_m за допомогою виразу (3.10).

Для добротності коливального контуру, утвореного елементами R_m , C_m , L_m справедливе також і в наступному співвідношенні:

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

$$Q = \frac{\omega_s L_m}{R_m} = \frac{1}{R_m \omega_s C_m} = \frac{1}{R_m} \sqrt{\frac{L_m}{C_m}}, \quad (3.13)$$

Визначивши з графіка величину R_m (за допомогою (2.10)), f_s (безпосередньо), Q (за допомогою (3.1)), можна за допомогою першого виразу резонансу (3.12) отримати величину динамічної індуктивності:

$$L_m = \frac{Q R_m}{2\pi f_s}, \quad (3.14)$$

В результаті, використовуючи (3.9), можна визначити величину динамічної ємності:

$$C_m = \frac{1}{L_m (2\pi f_s)^2}, \quad (3.15)$$

Статична ємність C_0 може бути визначена за допомогою (3.12). Як зазначалося раніше, статичну ємність реального резонатора можна розглядати також за його геометрією і діелектричними властивостями:

$$C_0 = \varepsilon_0 A \left(\sum_{i=1}^m \frac{l_i^{-1}}{\varepsilon_i} \right), \quad (3.16)$$

де, l_i - товщина кожного з m шарів між електродами; ε_i - відносна діелектрична проникність цих шарів, $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м діелектрична проникність вільного простору, A - площа електрода.

Якщо статична ємність розраховується за допомогою (3.16), то (3.12) можна використовувати для визначення анти резонансної частоти. [22]

Модель Батерворта-ван Дайка досить добре описує реальний резонатор, якщо точно визначені параметри еквівалентної схеми. Як вже зазначалося, визначити ці параметри в рамках самої моделі неможливо. У цьому полягає основний недолік моделі. Другий недолік полягає в тому, що у еквівалентній схемі, зображеної на Рис. 3.1, є тільки одна резонансна (і антирезонансна) частота, в той час як у реального резонатора в широкому діапазоні частот є багато резонансів, що даються гармоніками вищих порядків (при певних умовах можуть мати також і паразитні резонанси). Ці гармоніки можуть бути отримані з схеми, зображена на рис. 2.1, якщо в неї додати кілька гілок R_m , C_m , L_m підключених паралельно одна до одної

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

(значення C_0 повинно бути одне для всіх цих гілок). Величини R_m , C_m , L_m для кожної гілки необхідно визначати описаним вище способом для кожного резонансу.

Еквівалентну схему на рис. 3.1 можна також доповнити різними елементами, які моделюють паразитні елементи монтажу конструкції резонатора, такі як ємності, індуктивності, опору, які неодмінно присутні в реальному конструкції. Можна знайти різні варіанти такої моделі, що називають модифікацією моделлю Батерворта-ван Дайка (ByD). На рис. 3.3 представлений один з варіантів еквівалентної схеми модифікованої моделі Батерворта-ван Дайка.

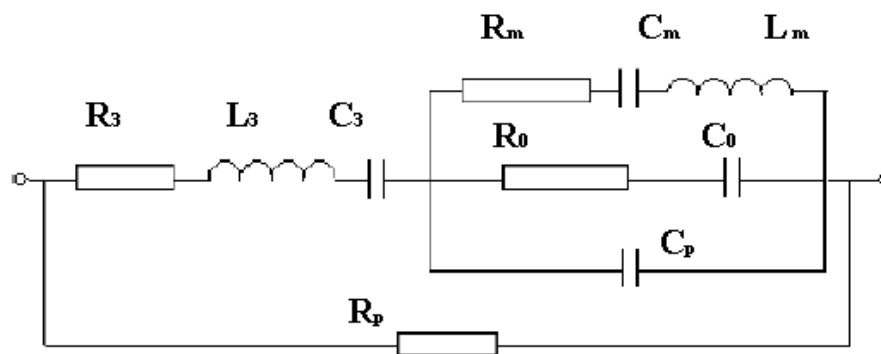


Рис 3.3: Один з варіантів еквівалентної схеми модифікованої моделі Батерворта - ван Дайка

В схемі R_3 – це паразитний опір електродів, підведучих доріжок, контактних майданчиків і зондів, за допомогою яких резонатор підключається до вимірювальної апаратури; C_s - послідовна ємність, через яку підключаються нижні електроди в планарній конструкції резонатора (коли підводячи доріжки верхніх і нижніх електродів розташовуються в верхній одній площині); L_3 – паразитна індуктивність підходящих доріжок; R_0 - паразитний опір статичному ємності C_0 ; R_p – еквівалентний опір, що моделює як можливі омичні шунтуючі втрати, так і акустичні втрати, зумовлені, наприклад, хвилями Лемба, які розповсюджуються уздовж поверхонь шарів; C_p – паразитна шунтуюча ємність елементів монтажу.

Будь-який з додаткових елементів може бути легко видалений з схеми шляхом завдання його величини, яка дорівнює нулю (окрім R_p і C_s).

Елементи R_p і C_s вимикаються зі схеми шляхом установки, навпаки, дуже великий їх величини, наприклад 10^9 (пФ або Ом відповідно).

Провідність еквівалентної схеми, зображена на рис. 3.3, розраховується за наступною формулою:

$$Y_{mBV D} = \left\{ \left[\left(R_m + \frac{1}{j\omega C_m} + j\omega L_m \right)^{-1} + \left(R_0 + \frac{1}{j\omega C_0} \right)^{-1} + j\omega C_p \right]^{-1} R_s + + \frac{1}{j\omega C_s} + j\omega L_s \right\}^{-1} + R_p^{-1}, \quad (3.17)$$

У разі необхідності в еквівалентну схему домодифікації моделі Батерворта - ван Дайка можуть бути додані і інші додаткові елементи. [23]

Висновки.

Таким чином, модель Батерворта-ван Дайка дає точний опис резонатора будь-якої конструкції, в тому числі на ОАХ, але за умови, вибору оптимальних компонентів. Підібрати номінали елементів можна тільки шляхом порівняння АЧХ, розрахованої для еквівалентної схеми, з аналогічною характеристикою, отриманої іншим незалежним способом. Таким чином, ця модель непридатна для попередніх розрахунків, необхідних при конструюванні резонатора, оскільки модель дозволяє успішно отримати точне рішення задачі тільки в тому випадку, якщо відповідь відома заздалегідь в деякому наближенні.

Для розрахунків, на які можна орієнтуватися при конструюванні, необхідні більш складні теоретичні моделі.

РОЗДІЛ IV. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

4.1 Числовий розрахунок параметрів ОАХ, які розповсюджуються в багатошарових тонко плівкових п'єзо еклектичних структурах.

Для поширення об'ємних акустичних хвиль необхідна наявність п'єзоелектричного середовища з товщиною більше, ніж половина довжини хвилі. Гарно зарекомендувала теорією для пошуку параметрів об'ємно акустичних хвиль в багатошарових тонкоплівкових структурах є модифікована теорія Навотного-Бенеша. Дана теорія заснована на точному розв'язанні рівнянь, яке описує хвильові процеси в матеріалах шарів, із яких складається резонатор, з використанням коректних граничних умов на всіх межах шарів. Одне обмеження цієї теорії – це те, що вона дозволяє отримувати рішення хвильових рівнянь лише в одновимірному просторі. Товщини шарів в таких конструкціях можуть варіюватися від одиниць до десятків і сотих часток мікрметра, а поперечні розміри – десятки і сотні мікрметрів. В зв'язку з цим, поперечні розміри можна вважати нескінченно великими, а крайовими ефектами знехтувати, – умови одновимірного наближення практично завжди виконуються для таких конструкцій. Багатошарова структура з N шарів схематично представлена на рис. 4.1. Вектор поширення об'ємно акустичної хвилі співнаправлена з віссю x .

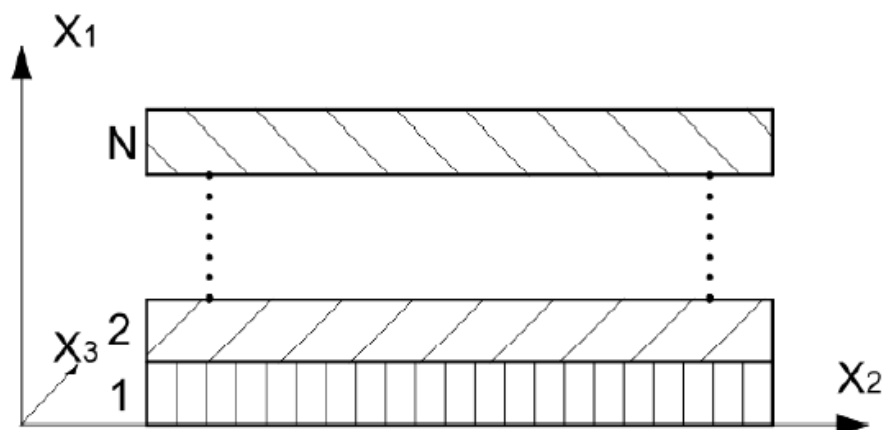


Рис. 4.1 Робоча система координат

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			51

В одновимірному електростатичному приближенні рівняння записується саме в такому вигляді:

$$c_{1jk_1} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_1^2} + e_{11j} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_1^2} = \rho \frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2} \quad (4.1)$$

де, $j=1,2,3 \quad k=1,2,3$

$$e_{11k} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_1^2} - \varepsilon_{11} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_1^2} = 0 \quad (4.2)$$

де, $k=1,2,3$

Рівнянні (4.1) і (4.2) є результуючою версією основних рівнянь п'єзо акустики. В яких u_k – механічне зміщення вздовж осі x_1 , φ – електричний потенціал, c_{1jk_1} тензор четвертого рангу пружних складових, e_{11k} – тензор третього рангу п'єзо електричних складових, ε_{11} – тензор другого рангу діелектричної проникності середовища, ρ – щільність середовища, t – час. Незважаючи на те, що в рівняння входить лише координата x_1 , вираз містить всі три просторові координати зсуву u_k , це дозволяє розглянути як ОАХ, так деякому наближенні інші хвилі.[24]

Ці диференціальні рівняння п'єзоакустики описують рух частинок в п'єзоелектричному середовищі та пов'язане з рухом електростатичне поле у вільному від зарядів кристалічному п'єзоматеріалі. Ця система включає в себе рівняння напруженості, матеріальне рівняння Максвела для п'єзоелектричного кристала, динамічні рівняння середовища, рівняння електростатичного приближення.

Для моделювання втрат поширення хвилі деякі із матеріальних констант середовища повинні мати коефіцієнти, що відповідають за затухання акустичної хвилі в матеріалі (від 0,1% до 1% від самої величини). В цій теорії найбільш зручно включити уявну частину в щільність середовища. Уявна частина щільності буде забезпечувати наявність уявної частини амплітуди швидкості хвилі, тобто згасання, незалежно від орієнтації кристала та класу його симетрії. Оскільки акустичні властивості матеріалів можуть сильно відрізнятися, коефіцієнт загасання для кожного матеріалу підбирається окремо.

Рішення для потенціалу знаходиться в вигляді:

$$\varphi = \frac{e_{11k}}{\varepsilon_{11}} + \varphi_1 x_1 + \varphi_0 \quad (4.3)$$

де, φ_1 і φ_0 – невідомі константи.

Після підстановки значення (4.3) в систему рівнянь (4.1), та проведення спрощення отримаємо наступу систему алгебраїчний рівнянь:

$$c_{1\bar{j}k_1} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_1^2} = \rho \frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2} \quad (4.4)$$

$$\text{де,} \quad c_{1\bar{j}k_1} = c_{1jk_1} \frac{e_{11j}e_{11k}}{\varepsilon_{11}} \quad (4.5)$$

Вирішення знаходиться у вигляді синусоїдальної хвилі, що розповсюджується вздовж x_1 :

$$u_k(x_1, t) = \beta_k e^{j\omega(\frac{x_1}{v} - t)} = \beta_k e^{j\omega(\alpha x_1 - t)} \quad (4.6)$$

де, $\alpha = \frac{1}{v}$ – сповільнення

Після підстановки (4.6) в (4.4), певних спрощень і скорочень отримаємо систему лінійних рівнянь:

$$c_{1\bar{j}k_1} \beta_k = \bar{c} \beta_j \quad (4.7)$$

де,

$$\bar{c} = \frac{\rho}{\alpha^2} = \rho v^2 \quad (4.8)$$

Систему рівнянь можна записати у більш раціональному вигляді, саме в такому вигляді:

$$(\bar{c}_{1111} - \bar{c})\beta_1 + \bar{c}_{1121}\beta_2 + \bar{c}_{1131}\beta_3 = 0, \quad (4.9)$$

$$\bar{c}_{1211}\beta_1 + (\bar{c}_{1221} - \bar{c})\beta_2 + \bar{c}_{1231}\beta_3 = 0,$$

$$\bar{c}_{1311}\beta_1 + \bar{c}_{1321}\beta_2 + \bar{c}_{1331}\beta_3 = 0.$$

Система рівнянь записана по відношенню до амплітуд $\beta_1, \beta_2, \beta_3$. І відповідно система рівнянь має рішення, відмінне від нуля, якщо значення матриці дорівнює нуля.

$$\begin{bmatrix} \bar{c}_{1111} - \bar{c} & \bar{c}_{1121} & \bar{c}_{1131} \\ \bar{c}_{1211} & \bar{c}_{1221} - \bar{c} & \bar{c}_{1231} \\ \bar{c}_{1311} & \bar{c}_{1321} & \bar{c}_{1331} \end{bmatrix} = 0. \quad (4.10)$$

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

Отже, отримуємо рівняння третього ступеня щодо \bar{c} , тобто для $\rho\vartheta^2$. Три корені даного рівняння дають три власних значення $\bar{c}^{(n)}$ ($n=1..3$), кожному з яких відповідає значення швидкості $\bar{\vartheta}^{(n)}$ (або прискорення $\bar{a}^{(n)}$)

Кожному значенню швидкості відповідає 3 значення амплітуди $\beta_k^{(n)}$, ($k=1..3$) . Вони знаходяться при підстановці значень швидкості в систему (1.9). Так як система рівнянь (1.9) однорідна, то рішенням будуть власні вектори із точністю до множника. Це дозволяє нормувати всі вектори та оперувати вже безрозмірними нормалізованими величинами. Три власних вектора є повним базисом і ортогональні один до одного. Тобто:

$$\beta_k^{(n)} \beta_k^{(m)} = \delta_{nm}, \quad (4.11)$$

$$\sum_n \beta_k^{(n)} \beta_l^{(n)} = \delta_{kl}, \quad (4.12)$$

де, δ_{nm} - символ Кронекера

Загальне вирішення системи рівнянь (4.4) знаходимо у вигляді:

$$u_k(x_1, t) = u_k(x_1) e^{-i\omega t}, \quad (4.13)$$

де, u_k - це лінійна комбінація трьох об'ємних хвиль, отриманих раніше з рівняння (4.9):

$$u_k(x_1) = \sum_{n=1}^3 \beta_k^{(n)} [A^{(n)} \cos(\alpha^2 \omega x_1) + B^{(n)} \sin(\alpha^2 \omega x_1)], \quad (4.14)$$

У цій системі рівнянь шість невідомих коефіцієнтів лінійної комбінації $A^{(n)}$ і $B^{(n)}$. Оскільки розглядається поширення хвиль в п'єзоелектричному середовищі, до шести невідомих додається ще два коефіцієнти ϕ_0 і ϕ_1 з рівняння поширення потенціалу.

Для знаходження невідомих параметрів необхідно підставити в систему вісім виразів для граничних умов: три компоненти механічного зміщення u_j , три нормальні компоненти тензора напруги T_l , електричного потенціалу ϕ для координати x_l на границі пластин і нормаль компонента електричного зміщення.

$$T_{1j} = c_{1jk1} \frac{\partial u_k}{\partial x_1} + e_{11} \frac{\partial \phi}{\partial x_1} = \sum_n \beta_j^{(n)} \bar{c}^{(n)} \omega [-A^{(n)} \sin(\alpha^{(n)} \omega x_1 + B^{(n)} \cos(\alpha^{(n)} \omega x_1))] + e_{11j} \phi_1 \quad (4.15)$$

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

$$D_1 = e_{11k} \frac{\partial u_k}{\partial x_1} - \varepsilon_{11} \frac{\partial \varphi}{\partial x_1} = -\varepsilon_{11} \varphi_1, \quad (4.16)$$

Після підстановки $x_l = 0$ в (4.3), (4.15) - (4.16) отримуємо вісім рівнянь для визначення: $A^{(n)}$, $B^{(n)}$, ϕ_0 і ϕ_1

$$u_j(0) = \sum_n \beta_j^{(n)} A^{(n)}, \quad (4.17)$$

$$T_{1j}(0) = \sum_n \beta_j^{(n)} \bar{c}^{(n)} \alpha^{(n)} \omega B^{(n)} + e_{11j} \varphi_1, \quad (4.18)$$

$$\varphi(0) = \frac{e_{11k}}{\varepsilon_{11}} u_k(0) + \phi_0, D_1(0) = -\varepsilon_{11} \varphi_1, \quad (4.19)$$

Після вирішенні даної системи, враховуючи вирази нормування та ортогональності, можна знайти необхідні коефіцієнти, використовуючи такі вирази:

$$A^{(n)} = \beta_k^{(n)} u_k(0), \quad (4.20)$$

$$B^{(n)} = \frac{1}{\bar{c}^{(n)} \alpha^{(n)} \omega} \beta_j^{(n)} \left[T_{1j}(0) + \frac{e_{11k}}{\varepsilon_{11}} D_1(0) \right], \quad (4.21)$$

$$\phi_0 = \varphi_0 - \frac{e_{11k}}{\varepsilon_{11}} u_k(0), \quad (4.22)$$

$$\phi_1 = -\frac{1}{\varepsilon_{11}} D_1(0). \quad (4.23)$$

Ці коефіцієнти можуть бути отримані для будь-якої координати x_l , якщо вони відомі для початкової координати $x_0=0$.

Розглянемо нескінченний в поперечному напрямку шар товщиною l . Всі значення u_j , T_{1j} , D_1 і φ на кордоні шарів для координати $x = l$ можуть бути представлені як лінійна комбінація даних змінних для координати $x_l=0$ в матричному вигляді (4.24):

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ T_{11} \\ T_{12} \\ T_{13} \\ \varphi \\ D_1 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11}^{uu} & M_{12}^{uu} & M_{13}^{uu} & M_{11}^{uT} & M_{12}^{uT} & M_{13}^{uT} & 0 & M_1^{uD} \\ M_{21}^{uu} & M_{22}^{uu} & M_{23}^{uu} & M_{11}^{uT} & M_{12}^{uT} & M_{13}^{uT} & 0 & M_2^{uD} \\ M_{31}^{uu} & M_{32}^{uu} & M_{33}^{uu} & M_{11}^{uT} & M_{12}^{uT} & M_{13}^{uT} & 0 & M_3^{uD} \\ M_{11}^{Tu} & M_{12}^{Tu} & M_{13}^{Tu} & M_{11}^{TT} & M_{12}^{TT} & M_{13}^{TT} & 0 & M_1^{TD} \\ M_{21}^{Tu} & M_{22}^{Tu} & M_{23}^{Tu} & M_{11}^{TT} & M_{12}^{TT} & M_{13}^{TT} & 0 & M_2^{TD} \\ M_{31}^{Tu} & M_{32}^{Tu} & M_{33}^{Tu} & M_{11}^{TT} & M_{12}^{TT} & M_{13}^{TT} & 0 & M_3^{TD} \\ M_1^{\varphi U} & M_2^{\varphi U} & M_3^{\varphi U} & M_1^{\varphi T} & M_2^{\varphi T} & M_3^{\varphi T} & 1 & M^{\varphi D} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ T_{11} \\ T_{12} \\ T_{13} \\ \varphi \\ D_1 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

Матриця M розмірністю 8×8 - ця матриця переходу для одного шару. Дана матриця дозволяє розрахувати параметри u_j , T_{1j} ($j = 1..3$), D_1 і φ для однієї поверхневого шару, знаючи ці параметри для іншого.

Елементи матриці M визначаються рішенням хвильових рівнянь:

$$M_{ij}^{uu} = M_{ij}^{TT} = \sum_n \beta_i^{(n)} \beta_j^{(n)} \cos(\alpha^{(n)} \omega l), \quad (4.25)$$

$$M_{ij}^{uT} = \frac{1}{\rho \omega} \sum_n \beta_i^{(n)} \beta_j^{(n)} \alpha^{(n)} \sin(\alpha^{(n)} \omega l), \quad (4.26)$$

$$M_{ij}^{Tu} = \rho \omega \sum_n \beta_i^{(n)} \beta_j^{(n)} \vartheta^{(n)} \sin(\alpha^{(n)} \omega l), \quad (4.27)$$

$$M_i^{uD} = M_i^{\varphi T} = \frac{1}{\omega \sqrt{\rho \varepsilon_{11}}} \sum_n \beta_i^{(n)} k^{(n)} \sin(\alpha^{(n)} \omega l), \quad (4.28)$$

$$M_i^{TD} = M_i^{\varphi u} = -2 \sqrt{\frac{\rho}{\varepsilon_{11}}} \sum_n \beta_i^{(n)} k^{(n)} \vartheta^{(n)} \sin^2 \frac{(\alpha^{(n)} \omega l)}{2}, \quad (4.29)$$

$$M^{\varphi D} = \frac{1}{\varepsilon_{11}} \left[1 - \frac{1}{\omega l} \sum_n k^{(n)2} \vartheta^{(n)} \sin(\alpha^{(n)} \omega l) \right], \quad (4.30)$$

$$\text{де, } k^{(n)} = \frac{\beta_i^{(n)} e_{11j}}{\sqrt{\varepsilon^{(n)} \varepsilon_{11}}}, \quad (4.31)$$

В рівняннях (4.25) – (4.31), $i, j = 1..3$ (номера координатних осей), $n = 1..3$ (номера власних рішень хвильових рівнянь). Змінна $k^{(n)}$ – коефіцієнт електромеханічного зв'язку п'єзоелектричного середовища ($k^{(n)} = 0$ для неп'єзоелектричних матеріалів). Якщо товщина шару прямує до нуля, матриця прагне до одиничної.

Послідовно обчисливши параметри u_j , T_{1j} , D_1 і φ , отримаємо значення цих величин для багатошарової структури (рис 1.2), а матрицю переходу можна знайти перемноживши послідовно матриці переходу для кожного шару:

$$M = M_1 * M_2 * \dots M_n, \quad (4.32)$$

Шари багатошарової структури, які розраховуються можуть бути будь-якими, але якщо шар використовувати як електрод, то його матриця переходу відрізнятиметься описаної вище, оскільки вона повинна включати умови для опису еквівалентної поверхні. На рис. 4.2 приведена схема підключення пристрою до джерела струму.

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

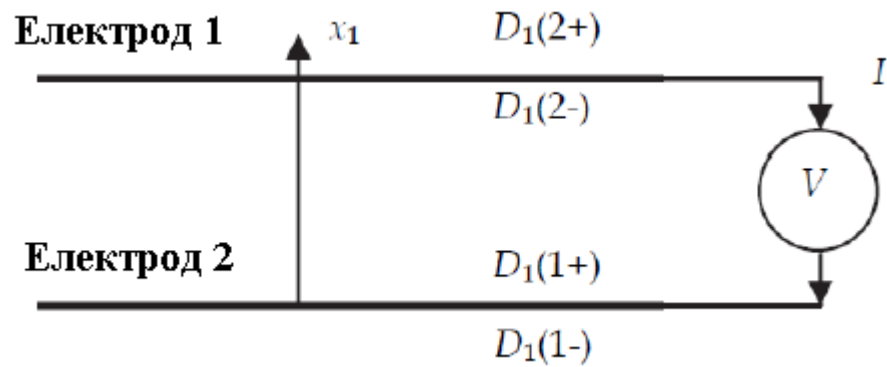


Рис. 4.2 Схема підключення пристрою до джерела струму.

Ці теорії дозволяють розрахувати потенціал і зміщення в кожній точці x_1 багат шарової структури, що складається з будь-якої кількості шарів, що можуть бути виконані з будь-якого матеріалу для ОАХ. Ці теорії зручні для математичного моделювання тонкоплівкових акусто-електронних резонаторів на об'ємно акустичних хвилях. Недоліком теорії є її одновимірності, проте вона використовується для розрахунку об'ємно акустичних хвиль в багат шарових розрахунках параметрів і структурах пристроїв на об'ємно акустичних хвилях в першому наближенні, без урахування поперечних розмірів шарів.

4.2 Метод скінченних елементів для вирішення рівнянь п'єзо-акустики.

Методи аналізу хвильових процесів для кожного типу хвиль приймаються в залежності від природи хвиль. Окрім того, при більшій складності конструкції пристрою, методи можуть стати просто незастосовні, або будуть потребувати істотного доопрацювання.

При розробці акустoeлектронних пристроїв, наприклад резонаторів, необхідно мати уявлення про комплексні акустичні процеси, які відбуваються в структурі, враховуючи при цьому розміри і особливості конструкції. Широке поширення для цих цілей отримав метод кінцевих елементів.

В основі методу скінченних елементів МСЕ лежить розділення об'єму на симплекси — обчислення взаємодії між ними в залежності від граничних умов і кінцеві елементи КЕ.

Приводиться така умовна послідовність етапів для застосування МСЕ:

- суцільне середовище розбивається уявними площинами на деяку кількість елементарних обсягів (КЕ);
- передбачається, що елементи пов'язані між собою у вузлових точках, розташованих на їх кординах. Основними невідомими є переміщення цих точок;
- вибирається система функцій, що однозначно визначає переміщення всередині кожного кінцевого елемента через переміщення вузлових точок;
- функції переміщень однозначно визначають деформацію всередині елемента через вузлові переміщення. Ці деформації при відомих пружних властивостях та початкових деформаціях елемента дозволяють визначити напруги як на його кордонах так і в середині елемента;
- визначається система сил, зосереджених у вузлах, і зрівноважуючої напруги на кордоні і деякі розподілені навантаження, а потім записуються відповідні співвідношення.[25 с.13-20]

Варто відзначити те, що найпершим кроком є в введення осей координат. В методі скінченних елементів, як правило, розрізняють локальні та глобальні системи координат, а також системи координат з напруженням в вузлових точках. Глобальні осі координат задаються для всієї конструкції в цілому, яка складається з безлічі кінцевих елементів. Локальні (або елементні) осі координат пов'язані з окремими елементами. Оскільки елементи в загальному випадку можуть бути по різному орієнтовані одна відносно іншої, то локальні осі в загальному випадку будуть мати різну орієнтацію.

За останній час МСЕ набув широкого розповсюдження, але найчастіше його застосовують для вирішення завдань механіки. Застосування метода скінченних елементів для опису п'єзоакустичних процесів вперше описано в роботі, автором були знайдені аналогії між електричними і механічними властивостями середовища, що дозволило об'єднати їх в єдине співвідношення.

Для переходу до кінцево-елементного формулювання від диференціальних хвильових рівнянь п'єзо-акустики необхідно записати ці вирази в альтернативному

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

варіаційному формулюванні. Як відомо, такий запис можливий для більшості завдань, що записані у вигляді диференціальних рівнянь.

Найчастіше для переходу до варіаційного формулювання використовується метод переміщень. Даний метод еквівалентної мінімізації повної потенційної енергії системи, виражений через поле переміщень. Таким чином основні рівняння п'єзо-акустики можна записати в альтернативно варіаційному формулюванні наступним чином:

$$\int (\{\delta S\}^T [c] \{S\} - \{\delta S\}^T [e]^T \{E\} - \{\delta E\}^T [e]^T \{S\} - \{\delta E\}^T [e]^T \{E\} - \{\delta u\}^T \{\bar{F}\} + \rho \{\delta u\}^T \{\ddot{u}\} + \delta \varphi \bar{\omega}) dV - \int \{\delta u\}^T \{\bar{T}\} dS + \int \delta \varphi \bar{\sigma}' dS - \{\delta u\} \{P\} + \delta \varphi Q = 0, \quad (4.33)$$

де, \bar{F} - вектор об'ємної сили, \bar{T} - вектор сили, що діє на поверхню, P - вектор точкової сили, $\bar{\sigma}$ - об'ємний заряд, $\bar{\sigma}'$ - поверхневий заряд, Q - точковий заряд, V - об'єм середовища, S - площа поверхні, $\{u\}$ - вектор зсувів, φ - потенціал. Верхній індекс T означає транспонування.

У кінцево-елементному формулюванні механічне зміщення $\{u\}$ і електричного потенціал φ для кожного елемента записуються через відповідні вузлові ступеня свободи за допомогою функції форми:

$$\{u\} = [N_u] \{u_i\}, \quad (4.34)$$

$$\varphi = [N_\varphi] \varphi_i. \quad (4.35)$$

де, $\{u_i\}$ і φ_i - вузлові невідомі. Використовуючи рівняння (4.34) і (4.35) вектор пружних деформацій $\{S\}$ і вектор електричного поля $\{E\}$ запишуться як:

$$\{S\} = [B_u] \{u_i\}, \quad (4.36)$$

$$\{E\} = -[B_\varphi] \varphi_i \quad (4.37)$$

де, B_u і B_φ матриці, які складені з градієнтів функцій форми для $\{u_i\}$ і φ_i . Тоді тензор механічної напруги T і електричне зміщення D можна записати як:

$$\{T\} = [c][B_u] \{u_i\} + [e][B_\varphi] \varphi_i, \quad (4.38)$$

$$\{D\} = [e]^T [B_u] \{u_i\} + \varepsilon [B_\varphi] \varphi_i. \quad (4.39)$$

Тоді зовнішні впливи можна описати як:

$$\{\bar{F}\} = [f_{\bar{F}}]\{\bar{F}_i\}, \quad (4.40)$$

$$\{\bar{T}\} = [f_{\bar{T}}]\{\bar{T}_i\}, \quad (4.41)$$

Підставивши вирази (4.36) - (4.41) в варіаційне рівняння (4.35), отримаємо два рівняння рівноваги в матричному вигляді:

$$[m]\{\ddot{u}_i\} + [\alpha]\{\dot{u}_i\} + [k_{uu}]\{u_i\} + [k_{u\varphi}]\varphi_i = \{F_B\} + \{F_S\} + \{F_P\}, \quad (4.42)$$

$$[k_{\varphi u}]\{u_i\} + [k_{\varphi\varphi}]\{\varphi_i\} = \{Q_B\} + \{Q_S\} + \{Q_P\}, \quad (4.43)$$

де, $[m]$ - матриця маси, $[k_{uu}]$ - матриця жорсткості елемента, $[k_{u\varphi}]$ і $[k_{\varphi u}]$ - п'єзоелектричні матриці "жорсткості", $[k_{\varphi\varphi}]$ - діелектрична матриця "жорсткості", $\{F\}$ - еквівалентні вузлові сили, а $\{Q\}$ - еквівалентні вузлові заряди, які виражаються безпосередньо з рівняння (4.43).

Для обмеження рішення на резонансних частотах, в рівняння руху зазвичай вводять демпфірування, що може мати різну природу. В цьому випадку воно вводиться за допомогою матриці коефіцієнтів $[\alpha]$

Використовуючи матриці жорсткості (4.38) - (4.41) та систему рівнянь (4.42) можна записати єдине матричне співвідношення:

$$\begin{bmatrix} k_{uu} & k_{u\varphi} \\ k_{\varphi u} & k_{\varphi\varphi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \varphi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_{uu} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_B + F_S + F_P \\ Q_B + Q_S + Q_P \end{bmatrix}, \quad (4.44)$$

Ця система дозволяє зробити оцінку внеску кожного КЕ в глобальну матрицю маси в механічну, діелектричну і в п'єзоелектричну матрицю жорсткості. Вирішуючи дану систему рівнянь, отримаємо розподіл значень ступенів свободи, трьох компонент зсуву u_i і потенціалу φ в залежності від граничних умов.[26]

Висновки.

Після проведеної практично-теоретичної роботи порівняльного аналізу методів, які дозволяють зробити розрахунок основних параметрів акусто-електричних хвиль в плівкових середовищах, було продемонстровано, що при наявності досить складних граничних умов на них накладаються значні обмеження, а деякі й зовсім не можуть бути застосовні. Окрім того, ні одна із методик не дозволяє оцінити одночасно всі хвилі, що можуть бути збуджені в багатошарових структурах складної конфігурації, які є базою тонкоплівкових

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

резонаторів, та оцінити вплив тих чи інших хвиль на характеристики і параметри пристрою.

Метод КЕ дозволяє побудувати модель багат шарової п'єзоелектричної структури та отримати параметри комплексного акустичного процесу, який відбувається в багат шаровій тонкоплівковій структурі з врахуванням поперечних розмірів кожного шару. Дані властивість мають дуже важливе практичне застосування для розрахунку основних параметрів НВЧ тонко-плівкових акусто-електронних резонаторів.

Доведено, що:

- використання верхнього електрода, який повністю покриває п'єзо плівку, дозволяє в значному степені запобігати виникненню зсувних хвиль хвиль Релея - Лемба в конструкції резонатора. При використанні планарної конструкції і резонатора такого ж ефекту можна домогтися при витравлюванні п'єзоелектрика в зоні між заземлюючим і сигнальним електродом;
- формування «сходинок» по краю верхнього електрода дозволяє локалізувати акустичну енергію всередині активної області резонатора;
- використання асиметричного акустичного відбивача дозволяє підвищити добротність резонатора на 5% - 50% в залежності від частоти і форми електрода;
- в якості матеріалу електродів необхідно вибирати матеріали з хорошою акустичною добротністю і малим питомим опором.

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

ВИСНОВКИ

Проведені в роботі експериментальні і теоретичні дослідження дозволяють сформулювати ряд висновків і пропозицій з математичного моделювання хвильових процесів в багатошарових тонко-плівкових п'єзоструктурах і поліпшенні конструкції НВЧ тонко-плівкових акусто-електронних резонаторів для оптимізації параметрів пристрою.

В області теоретичного розрахунку параметрів тонко-плівкових акусто-електронних резонаторів показано:

1. Для вирішення хвильових рівнянь п'єзо-акустики, які описують утворювальні процеси в тонко-плівкових багатошарових п'єзо-структурах, МСЕ допустимо використовувати для аналізу параметрів НВЧ і математичного моделювання тонко-плівкових акусто-електронних резонаторів.

2. Теоретично підтверджено, що на відміну від одновимірної теорії в тонко-плівковому акусто-електронному резонаторі збуджуються не тільки ОАХ, що є робочими в розглянутих пристроях, а й інші типи АХ, включаючи хвилі Релев-Лемба і повздовжні ОАХ. Це дозволяє модифікувати конструкцію тонко-плівкового резонатору та досягти кращих показників кінцевого пристрою.

3. Теоретично підтверджено, що в розрахунках тонко плівкових акусто-електронних резонаторів необхідно врахувати не тільки процеси, які мають акустичну природу, а й омічні втрати контактних майданчиків, індуктивності підвідних доріжок, шунтуючі і поверхневі ємності конструкції. При застосування цього методу розрахунків основних параметрів тонко плівкових резонаторів можемо отримати за допомогою теоретичного аналізу характеристик, практично і характеристиками пристрою, що з великою долею ймовірності будуть співпадати.

В області створення і розробки багатошарових тонко-плівкових резонаторів при використанні математичного моделювання було отримано ряд технічних рішень для покращення характеристик пристроїв:

1. Математичне та теоретичне моделювання показали, що підбір акустичного відбивачі в тонко-плівкових резонаторах дозволяє знизити втрати

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

енергії за рахунок збереження енергії зсувних акустичних коливань в активній області резонатора, тим самим, підвищується добротність Q пристрою. Але при цьому зростають й вимоги до точності технології виготовлення пристрою. При значному відхиленні матеріальних констант матеріалів шарів або товщини шарів створеного пристрою від розрахованих теоретично, добротність пристрою різко впаде.

2. Застосування комбінованого аналізу з використанням методу скінченних елементів моделі і модифікованої еквівалентної схеми Батерворта-ван Дайка дозволяє теоретично розцінити вплив омічних втрат в контактних майданчиках на характеристику резонатора. Теоретичний аналіз показав, що збільшення омічного опору доріжок всього на 1 Ом призводить до зниження величини добротності на величину від 60% до 75% для різних частот, причому, чим вище частота, тим сильніше падає добротність;

3. Використання методу скінченних елементів моделювання дозволило проаналізувати і оцінити вплив технологічних похибок на основні параметри резонаторов різних конструкцій. Це дозволяє оцінити пристрої при експериментальних дослідженнях.

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кобак Н. Н., Терих В. В., Грамарчук Ю. О. «НВЧ – синтезатор частоты з опорним генератором на ОАХ», 6-7 квітня 2017 р., Україна, Київ.
2. Семенов Э. А., Мичурин Э. В., Посадский В. Н.. Основные принципы модульного построения и результаты разработок СВЧ – синтезаторов для РЛС// Радиотехника.-2002.-№2.-С. 75-76
3. Brown J. Speedy synthesizers cut spurious levels and signal delays// Ibid. – 1995. – N6. – P. 140-142;
4. Альтман Дж. Устройства сверхвысоких частот.- М.: Мир,1968
5. Васильев Я.О., Манченко Л. В., Пчелкин В.А., Трегубов В.Б. Усилители мощности для АФАР X-диапазона в ГИС исполнении. В кн.: 17-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Материалы конференции [Севастополь, 10-14 сент. 2007 г.]. Севастополь: Вебер, 2007, с. 52,53
6. Ефимов В.В. Проектирование радиоприемных устройств. Учебное пособие. М : Высшая школа.1982
7. IEEE, Piscataway, NJ. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification. 1997.
8. Двоешество М.Ю., Чередник В.И., Босов С.И., Моделирование многослойных резонаторов на объемно акустических волнах // Труды XVII Международной НТК «Радиолокация, навигация, связь». 2011. с.3228
9. Монолитный генераторы свч-диапазона, электроника: наука, технология, бизнес, А. Галдецкий, 4/2005
10. Мэттьюз Г. Фильтры на поверхностных акустических волнах. Расчет, технологии и применение. М.: Радио и связь, 1981
11. Бодров В.В, Сурков В.И. Математическое моделирование устройств СВЧ и антенн. М.: Изд-во МЭИ, 1994
12. Балдин А.М., Бонч-Бруевич А.М. Физическая энциклопедия. Советская энциклопедия, 1990. С.649-650

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

13. Viktorov I. Rayleigh and Lamb Waves : Physical Theory and Applications. New York: Plenum Press, 1967. p. 154
14. Gulyaev Y. V. Surface electroacoustic waves in solids // J. Exper. Theor. Phys. Lett. (Sov.). 1968. Vol. 9. P. 63-64.
15. Cherednik V., Dvoesherstov M. Surface and Bulk Acoustic Waves in Multilayer Structures // Waves in fluids and solids / Ed. by R. P. Vila. INTECH, 2011. P. 69-102.
16. Makkonen T. Numerical Simulations of Microacoustic Resonators and Filters. Ph.D. thesis: Helsinki University of Technology. 2005.
17. Finite Element Simulations of Thin-Film Composite BAW Resonators / T. Makkonen, Holappa A., J. Ella // IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. 2001.
18. Банков С.Е., Курушин А.А., Разевиг В.Д.. Анализ и оптимизация трехмерных СВЧ структур с помощью HFSS // М.: Солон-Пресс. 2005.
19. Монолитный генераторы свч-диапазона, электроника: наука, технология, бизнес, А. Галдецкий, 4/2005
20. Глюкман Л.И. Пьезоэлектрические кварцевые резонаторы. – Л.: Энергия, 1969. – 260 с.
21. Soluch W. Scattering matrix approach to one-port SAW resonators // IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Society. – 2000. – Vol. 47, no. 6. – P. 1615-1618.
22. Yariv A., Nakamura M. Periodic Structure for Integrated Optics // IEEE journal of quantum electronics. 1977. Vol. QE-13, no. 4. P 233-253.
23. Nowotny H., Benesh E. General one-dimensional treatment of the layer piezoelectric resonator with two electrodes // Journal of Acoustic. Society of America. 1987. Vol. 82, no. 2. P. 513-521.
24. Cherednik V., Dvoesherstov M. Surface and Bulk Acoustic Waves in Multi-layer Structures // Waves in fluids and solids / Ed. by R.P. Vila. INTECH, 2011. P.69-102.

					МП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			

25. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. с.
539.
26. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. М.: Мир, 1984. с.
428.

					МРП.171.081.011 ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпи			